



CONTENIDO

DIRECTORIO	2
EDITORIAL	3
BASES	4



INVESTIGACIÓN

	HETEROESTRUCTURAS DE CRISTALES FOTONICOS Manzanares-Martinez, Castro-Garay, Archuleta-Garcia y D. Moctezuma-Esquer.	5
	FORMACION DE BURBUJAS Y CASCARONES ALREDEDOR DE ESTRELLAS DE ALTA MASA Pérez Rendón, Santillá, García-Segura, Hernández Cervantes	11
	EQUILIBRANDO UNA ESCOBA: CONCEPTOS BÁSICOS DE LA TEORÍA DEL CONTROL. EL PENDULO INVERTIDO Munguía Aguilar, Espinoza Valencia	19
	DISEÑO Y ELABORACIÓN DE PROTOTIPO SEGUIDOR SOLAR DE DOS GRADOS DE LIBERTAD PARA CELDAS SOLARES FOTOVOLTAICAS Ozuna Huerta, Anaya Pérez, Pitalua Díaz, Anaya Eredias	25
	CAÍDAS EN EL ADULTO MAYOR: FACTORES DE RIESGO QUE REPERCUTEN EN SU ESTADO DE SALUD Escobar Castellanos, Martínez Martínez, Villegas Castro	32
	DINÁMICA CLÁSICA Y FRAGMENTACIÓN EN EL PROCESO DE FORMACIÓN DE PROTO-ESTRELLAS. Arreaga García, Oreste Topa y Arreaga	39
	IDENTIFICACIÓN DE IMÁGENES Y VOCES MEDIANTE REDES DE HOPFIELD Castellanos Moreno, López Aguirre	47
	LIMPIEZA DE SUELOS CONTAMINADOS APLICANDO CAMPOS ELÉCTRICOS: UNA METODOLOGÍA PARA SU ESTUDIO Y EVALUACIÓN Rubio Nieblas, Pérez Tello, Jacobs, Espinoza Meléndrez, Ochoa Landín	52
	UNA APLICACIÓN DEL TEOREMA DE BAYES EN PRUEBAS DE DIAGNÓSTICO. Bautista Jacobo	58




DESDE LA ACADEMIA

	EI CONSUMO DE ALCOHOL EN LAS ENTIDADES DEL NORTE DE MÉXICO. Ponce Serrano	64
	MORINGA UNA PLANTA PARA EL SIGLO XXI: NUEVO CULTIVO PARA SONORA Romero Rafael, Vargas López, y Soqui León	71
	EL SISMO DE LA SIERRA EL MAYOR – EI BORREGO (4 DE ABRIL DEL 2010, Mw 7.2) Y SU IMPACTO EN LA ZONA RURAL DE SAN LUIS RÍO COLORADO, SONORA Minjárez Sosa, Ochoa Granillo, Espinoza Maldonado, Montijo González, Villa Terán, Ruiz Germán	78

POLÍTICAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

	GESTIÓN DEL CONOCIMIENTO MANUFACTURERO EN PYMES DE HERMOSILLO, SONORA. Mesinas Cortes	83
	LOS SISTEMAS DE GESTION AMBIENTAL PARA AVANZAR HACIA LA SUSTENTABILIDAD EN LAS UNIVERSIDADES Jorge Luis Taddei Bringas	89

CTS-EPISTEMUS

	POSIBLE ORIGEN ASTRONÓMICO DE LAS UNIDADES DE LONGITUD DEL SISTEMA INGLÉS Colaboración de Carlos Vogt	95
	OBESIDAD. UN GRAN PESO PARA SONORA Victor M. Calles Montijo	101
	INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS García Llamas	105
	NOTI-INGENIO Coleccion de Fósiles en la Frontera	109
	BREVARIOS DE CIENCIA	111
	CIENTIGRAMA Salinas Covarrubias	112

EPISTEMUS



UNIVERSIDAD DE SONORA

Dr. Heriberto Grijalva Monteverde
Rector
Dr. Enrique F. Velázquez Contreras
Secretario General Académico
M.E. Rosa Elena Trujillo Llanes
Secretaria General Administrativa
Dra. Arminda Guadalupe García de León Peñúñuri
Vicerrectora de la Unidad Regional Centro
M.D.O. Manuel Ignacio Guerra Robles
Director de Vinculación y Difusión

DIRECCIÓN GENERAL

Dr. Jesús Leobardo Valenzuela García
Dr. Mario Onofre Cortez Rocha
M.C. Miguel Ángel Moreno Núñez

DIRECCIÓN EJECUTIVA

Ing. Rafael Pacheco Rodríguez

DIRECCIÓN EDITORIAL

M.C. Olga Barragán Hernández
Fis. Emiliano Salinas Covarrubias
M.C. Sandra M. Gómez Cuadras

COMITE EDITORIAL (En este número)

Dr. Raul Pérez Enríquez.
M.C. María de los Angeles Navarrete Hinojosa
M.C. René Hernández Rivera
M.C. Sandra M. Gómez Cuadras
Dra. Laura Lorenia Yeomans Reyna
Dr. Jesús Leobardo Valenzuela García
Dr. Eduardo Verdín López
Dra. Beatriz del Carmen Castañeda Medina
M. A. Mario Guzmán Márquez
Dr. Alfredo Padilla Barba

CORRECCIÓN DE ESTILO

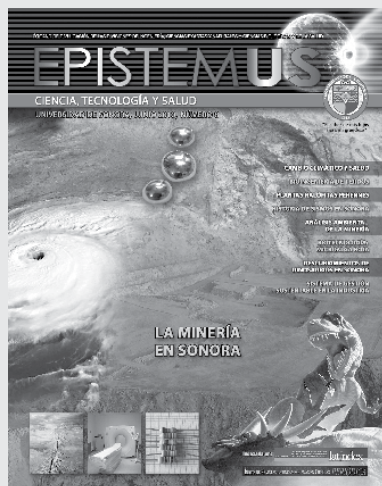
Emiliano Salinas C., Sandra M Gómez C.

DISEÑO

LDG Mónica F. Palacios Gurrola

IMPRESIÓN

COLOR EXPRESS DE MÉXICO, S.A DE C.V.
12 de octubre, No. 130
Col. San Benito, Hermosillo, Sonora



UNIVERSIDAD DE SONORA

EPISTEMUS es una publicación de divulgación científica y tecnológica de las Divisiones de Ingeniería, Ciencias Exactas y Naturales y Ciencias Biológicas y de la Salud de la Universidad de Sonora, Unidad Regional Centro. Su edición es semestral, con un tiraje de 1000 ejemplares los cuales se distribuyen en todo el País.

La versión electrónica puede consultarse en la página web de la Universidad de Sonora: <http://www.uson.mx>, o bien en <http://www.ingenierias> (números anteriores). La responsabilidad de los artículos publicados es exclusiva de sus autores. Su contenido no representa necesariamente el punto de vista de la institución.

EPISTEMUS está INDEXADA en el Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal (LATINDEX) y en el Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias: PERIÓDICA por lo que se tiene acceso a la edición a nivel internacional.

REGISTRO DE RESERVA DE DERECHOS

Con fundamento en lo dispuesto por los artículos 173, 174, 175 y 189 de la Ley Federal del Derecho de Autor, 70 y 77 de su reglamento, el Instituto Nacional del Derecho de Autor, de la Secretaría de Educación Pública, otorgó el Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo en el género de Publicaciones Periódicas a la revista EPISTEMUS con la Reserva: 04-2010-020313043300. El ISSN está en trámite.

DIRECCIÓN

REVISTA EPISTEMUS Universidad de Sonora, Unidad Regional Centro, Blvd. Luis Encinas y Rosales, Colonia Centro. Hermosillo, Sonora, México. C.P. 83000. Teléfono: 01662 2592157. Correo: pacheco@coreom.uson.mx
Atn. Rafael Pacheco Rodríguez

La educación, la cultura, la ciencia y la tecnología son los elementos fundamentales en los que se basarse el desarrollo de un país. Los que aplicaron estos elementos hace décadas el día de hoy son las grandes potencias económicas del mundo. El camino ya es conocido, invertir en educación y en investigación es sentar sobre bases firmes nuestro desarrollo. Países con la misma historia que el nuestro, como Brasil, Chile, Argentina, por citar algunos, están logrando un desarrollo importante de su economía, por que han formulado estrategias de desarrollo basadas en el conocimiento, en el fomento a la innovación científica y tecnológica para fortalecer la competitividad en el mercado global. Un común denominador es que van de la mano el gobierno (políticas públicas), los empresarios y las universidades: la Triple Élice.

Sin embargo, en México no se está actuando en este marco, ya que el presupuesto que se destina a las universidades públicas es cada vez más escaso, y ni qué decir del limitado apoyo que se brinda a la investigación científica y tecnológica. El pasado mes de noviembre se realizó en la ciudad de Puebla la Tercera Reunión de Vinculación de la Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación Superior del país (ANUIES), en esta ocasión, participaron funcionarios públicos del gobierno federal, empresarios de corporativos importantes y universidades y tecnológicos de todo el país. Lo relevante de la reunión, es que se expuso la necesidad de impulsar conjuntamente proyectos estratégicos, trabajar en redes regionales de colaboración, formar recursos humanos calificados, fortalecer la innovación y la competitividad de las empresas con un sentido social. En las mesas de trabajo se puso énfasis en el gran potencial con que cuentan las Instituciones de Educación Superior en infraestructura física y recursos humanos.

La ruta para lograr el desarrollo sustentable de nuestro país ya se conoce, lo que hace falta es replicar y adaptar las experiencias exitosas de otros países, integrar esfuerzos, destinar recursos, trabajar todos los sectores organizadamente.

Una muestra del conocimiento que se genera en las universidades es la edición de la revista *Epistemos* la cual, nace como una preocupación de la Universidad de Sonora por divulgar el quehacer académico. Esfuerzos de este tipo se realizan en varias Instituciones de Educación Superior del país.

En este número se presentan las cuatro secciones: Investigación, Desde la academia, Políticas de ciencia y tecnología y Ciencia, tecnología y sociedad (CTS).

En Investigación, sobresalen los artículos que tiene que ver con nuestro universo, con la formación de estrellas en particular, con la colaboración de investigadores de renombre tanto de la Universidad de Sonora como de la Universidad Nacional Autónoma de México y de otros países. Se aborda también el tema de limpieza de suelos contaminados, se expone el diseño de un prototipo de seguidor solar, el problema de las caídas de adultos mayores como factor de riesgo, entre otros.

La sección Desde la academia destaca tres temas: el sismo de gran intensidad que se presentó a principios de año en el noroeste del estado de Sonora y Mexicali, la investigación sobre el consumo del alcohol en los estados fronterizos y, finalmente, se presenta un avance sobre la planta del siglo XXI, la *Moringa*.

El Políticas de ciencia y tecnología se seleccionaron dos artículos, el primero propone un sistema de gestión ambiental para avanzar hacia la sustentabilidad de las universidades y el segundo se presenta los resultados de un estudio sobre la gestión del conocimiento manufacturero de las pequeñas y mediana empresas de la ciudad de Hermosillo, Sonora.

En Ciencia, tecnología y sociedad, se nos invita a conocer el posible origen astronómico de las unidades de longitud del sistema inglés. Un tema de interés general y de gran preocupación, es el problema de la obesidad: un gran peso para Sonora. Un tema que nunca pierde vigencia, el agua, en este caso, el agua subterránea, visto desde el punto de vista de la física.

Como es costumbre se anexan las secciones de las noticias más relevantes del semestre, la gustada sección de brevíarios de ciencia y un reto a su conocimiento de la ciencia: El cientígrama.

Si usted gusta profundizar en alguno de los temas, se incluye el correo electrónico de los autores. Escribanos, externe sus comentarios o sugerencias al comité editorial.

La educación, la ciencia y tecnología son consideradas pilares fundamentales sobre los que se sustenta el desarrollo de un país, por eso es importante fortalecer el enlace entre los que generan el conocimiento y los beneficiados de ello: la sociedad. Uno de los aspectos que distingue a la Universidad de Sonora es la generación de conocimiento y su impacto que tiene en la sociedad. Es así como las Divisiones de Ingeniería, Ciencias Exactas y Naturales y Ciencias Biológicas y de la Salud crearon el proyecto editorial Epistemus el cual, constituye un medio de información y comunicación para dar a conocer, en forma comprensible, las investigaciones realizadas o en proceso, las actividades académicas, las reflexiones en torno a la ciencia y tecnología, la cultura científica y la sociedad, proyectos de vinculación y extensión de la cultura y los servicios.

OBJETIVO

Dar a conocer el conocimiento que se crea, genera y enseña en la Universidad de Sonora con finalidad de fortalecer la educación, la cultura científica y tecnológica y de la salud de los diversos sectores de la sociedad.

ÁREAS GENERALES DE CONOCIMIENTO

- Ingenierías: materiales, metalurgia, civil, minas, industrial, ambiental, hidráulica, sistemas de información, mecatrónica, alimentos, energía, agua, entre otras.
- Ciencias exactas y naturales: geología, física, matemáticas, electrónica y ciencias de la computación.
- Ciencias biológicas y de la salud: investigación en alimentos, desarrollo regional, acuacultura, salud, biología, agricultura, entre otras.

DIRIGIDA A

A los sectores relacionados con la educación y la investigación, a empresarios, a dependencias gubernamentales, estudiantes de nivel medio superior y superior y sociedad en general.

CONTENIDO DE LA REVISTA

Artículos de proyectos de investigación, reseñas, ensayos, información sobre ciencia y tecnología, eventos relevantes, convocatorias, noticias relevantes, educación, cultura, etcétera.

ENFOQUE DE LOS ARTÍCULOS

- Los artículos reflejarán lo más trascendente de la producción académica, los proyectos de ciencia, tecnología y sociedad que se realizan en la universidad y en particular en las tres divisiones.
- Los artículos deberán de hacer mención de la trascendencia de lo expuesto, su impacto en la solución de problemáticas específicas de la sociedad, del sector industrial, de la educación, de la cultura, entre otras.
- Se incluirán artículos que integren y reflexionen en torno a la ciencia, la tecnología y la sociedad, que aporten elementos precisos que permitan profundizar en el análisis y proponer esquemas de colaboración entre los que producen el conocimiento y los beneficiarios o usuarios potenciales.

- El lenguaje escrito debe ser de divulgación, comprensible para un público no especializado de nivel bachillerato aproximadamente, empresarios y profesionistas de otras especialidades.

ARBITRAJE

Comprende dos aspectos:

1. Arbitraje académico: En todos los casos, los artículos serán arbitrados por pares académicos.
 2. Arbitraje de divulgación: Se procurará que el lenguaje y el significado de lo expuesto no pierda la idea original al tratarlos como artículos de divulgación, para ello se contará con el apoyo en el arbitraje de académicos expertos en divulgación científica.
- Se les señalarán adecuaciones, modificaciones y sugerencias para que sean tomadas en cuenta por los autores. En todos los casos se definirán los tiempos para las correcciones.

CARACTERÍSTICAS DE LOS ARTÍCULOS

- La extensión de los artículos será máximo de 15 cuartillas, con figuras y fotos.
- Incluir fotos y gráficos de buena calidad en jpg o tiff de máxima resolución.
- Utilizar tipo de letra arial de 12 puntos con doble espacio.
- Incluir los datos curriculares de los autores, especificando el área de adscripción, perfil profesional y correo electrónico.
- Las referencias bibliográficas deberán aparecer citadas en el texto con un número entre paréntesis y no ser mayores de 3 por párrafo.
- Al inicio del texto deberá hacerse una descripción breve del contenido del artículo que no sea mayor de 10 renglones y que dé una idea clara del contenido y logre interesar al lector.
- Respecto a los autores y coautores, el primero que aparezca será el líder; los cuales en el caso del ensayo podrán ser un máximo de 3 y para el caso de los resultados de investigaciones podrán ser hasta 5.
- Cuando la colaboración sea en la modalidad de ensayo, hacer uso de subtítulos que faciliten la lectura del texto.
- Para la presentación del artículo deberá de ser en dos versiones: electrónica e impresa en papel, las cuales deberán enviarse al director de la revista, al correo: pacheco@correom.uson.mx.
- De publicarse el artículo, el autor deberá firmar carta de cesión de derechos de autor, la cual se enviará al director de la revista una vez aprobada su publicación por el comité editorial.

FECHAS DE RECEPCIÓN DE ARTÍCULOS

- Fecha límite de recepción de artículos: 24 de marzo de 2011.
- Diseño e impresión: Junio 2011

Mayores informes: Con el responsable de la División correspondiente.

HETEROESTRUCTURAS DE CRISTALES FOTÓNICOS

MANZANARES MARTÍNEZ, CASTRO GARAY, ARCHULETA-GARCÍA, MECTEZUMA ESQUER

En este trabajo hacemos un resumen de la investigación que se realiza a nivel mundial sobre las heteroestructuras de cristal fotónico con la idea de poner en perspectiva los resultados que se han obtenido sobre este tema en el Departamento de Investigación en Física de la Universidad de Sonora. Las heteroestructuras de cristal fotónico y en general, los cristales fotónicos son una nueva clase de materiales artificiales con los cuales puede ser posible, en principio, desarrollar una revolución tecnológica similar a la que ocurrió con la industria de la electrónica a mediados del siglo pasado con el advenimiento del transistor.

DR. JESÚS MANZANARES MARTÍNEZ
jmanza@cifus.uson.mx

DRA. PAOLA CASTRO GARAY
Correo: paola@cifus.uson.mx

M.C. RAÚL ARCHULETA-GARCIA
Correo: archuleta@posgrado.cifus.uson.mx

M.C. DAMIÁN MOCTEZUMA ESQUER
Correo: bersek_no1@hotmail.com
Departamento de Investigación en Física
Universidad de Sonora

CRISTALES FOTÓNICOS

La explotación tecnológica de los cristales electrónicos ha dado lugar a una de las más importantes revoluciones de la historia de la ingeniería, permitiendo un mundo moderno lleno de avances tecnológicos gracias al desarrollo de la electrónica. La mecánica cuántica que explica las propiedades de los electrones en diferentes materiales también ha permitido estudiar diversos aspectos de la interacción entre la radiación y la materia, como por ejemplo la emisión espontánea. En el interés de controlar la emisión espontánea que existe en ciertos materiales surgió el concepto de una nueva clase de materiales artificiales capaces de interactuar con las ondas electromagnéticas en un nivel estructural: los cristales fotónicos [1].

Históricamente, fue Bykov en 1972 [2] el primero en proponer que la emisión espontánea que un cierto átomo produzca podría ser reducida o inhibida colocándolo en una red periódica en la escala de la longitud de onda de la radiación para evitar el decaimiento del átomo en las bandas prohibidas. Sin embargo, este primer estudio no produjo mucho interés en el tema de la inhibición de la emisión espontánea en la comunidad científica.

El verdadero despertar en el interés acerca de la inhibición de la emisión espontánea tuvo que esperar hasta que fueron publicados dos trabajos, que desde enfoques distintos propusieron los llamados cristales fotónicos. Estos trabajos fueron realizados en 1987 por Eli Yablonovitch y Sajeev John. Desde entonces los cristales fotónicos han sido el objeto de un intenso trabajo de investigación, tanto por sus novedosas propiedades físicas, como por sus potenciales aplicaciones tecnológicas [3].

Los cristales fotónicos usualmente están compuestos por la repetición periódica de una celda unitaria en una, dos o tres dimensiones en donde existen dos materiales de diferente índice de refracción. En la Figura 1 presentamos una ilustración de la geometría de los cristales fotónicos. En estos materiales la periodicidad juega un papel muy importante, ya que debido a fenómenos de interferencia, se espera que existan bandas de energía permitidas y gaps de energía prohibidos. En las bandas las ondas se “conducen” a través de la red cristalina y en los gaps el material se considera un “aislante”, ya que las ondas no pueden propagarse. La periodicidad de los cristales fotónicos generalmente está en el rango de la longitud de onda de la luz visible (380-750 nm).

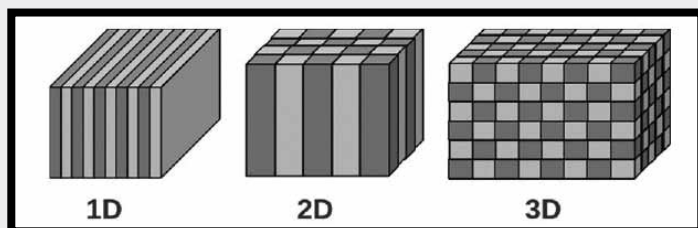


Figura 1. Cristales fotónicos con periodicidad en una, dos o tres dimensiones. Presentamos en diferentes tonos de grises los segmentos con diferentes índices de refracción.

Los cristales fotónicos tridimensionales son análogos a las redes cristalinas formadas por varios elementos o compuestos químicos (Si, Ge, Cl, NaCl, etc) en donde la periodicidad de los átomos da lugar a la interferencia de los electrones con la red, produciéndose las bandas de energía electrónicas que son comunes en la física del Estado Sólido. Algunos materiales presentan cierta forma de su estructura de bandas electrónicas que los definen como “semiconductores electrónicos” o más comúnmente, semiconductores. Hoy en día la industria de la electrónica, telecomunicaciones y la computación está basada en la explotación tecnológica de estos semiconductores.

Los cristales fotónicos son una nueva clase de materiales artificiales que pueden ser considerados “semiconductores ópticos”. Se espera que sea posible a través de estos nuevos semiconductores ópticos, por primera vez en la historia, lograr confinar, guiar y manipular el campo electromagnético y en particular, la luz en forma nunca antes vista. En este momento estamos empezando a comprender las posibilidades que tienen los cristales fotónicos para la tecnología del mañana.

En este punto es conveniente ilustrar lo importante que es hoy en día el control de la luz y para ello consideremos como ejemplo el uso de la fibra óptica para la transmisión de internet. No existe una forma más rápida de transmisión de la información que la luz en una fibra óptica. Sin embargo, aunque la información de internet se transmite por luz por medio de una fibra óptica, la manipulación de esta información se hace en las computadoras por medio de la electrónica. El reto tecnológico de los cristales fotónicos es diseñar dispositivos que manipulen los fotones en lugar de los electrones y crear, en principio, una tecnología alternativa a la electrónica en la que se manipulen fotones [3].

Para su explotación tecnológica, los semiconductores electrónicos han dejado una lección: el uso de heteroestructuras. Una heteroestructura está formada por dos o más redes cristalinas diferentes. En la Figura 2 mostramos una heteroestructura de cristal fotónico. Esta heteroestructura está compuesta por la unión de dos redes diferentes. En el lado izquierdo, tenemos una red compuesta por los materiales A y B. En el lado derecho tenemos una red compuesta por los materiales C y D.

Un gran ejemplo de uso tecnológico de heteroestructura es el transistor de estado sólido, el cual dio origen a la era de la electrónica. El transistor básico está compuesto por tres diferentes redes cristalinas que se unen para lograr el control del flujo de electrones. Esto se logra combinando convenientemente las propiedades de sus diferentes bandas de energía y gracias a una minúscula, pero muy significativa, inyección externa de electrones para sintonizar la banda de uno de los materiales.

En el Departamento de Investigación en Física, los autores se han dedicado a estudiar las heteroestructuras de cristal fotónico. En particular, nuestra meta es la de lograr “aislantes” ópticos a partir de heteroestructuras de cristal fotónico las cuales tengan una banda prohibida gigante, que no sea usual encontrar en cristales fotónicos canónicos.

A continuación vamos a hacer una breve revisión histórica del estudio teórico de los cristales fotónicos buscando poner en perspectiva las contribuciones de una serie de trabajos de investigación que hemos desarrollado sobre este tema.

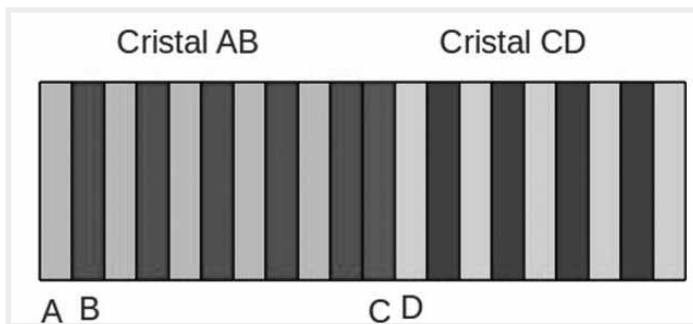


Figura 2. Heteroestructura de Cristal fotónico. En el lado izquierdo se muestra un cristal compuesto por los materiales A y B. En el lado derecho está otro cristal, compuesto por los materiales C y D.

LA DIFICULTAD DE OBTENER CRISTALES FOTÓNICOS EN EL RANGO DEL VISIBLE

Después de haber sido propuesta la idea de los Cristales Fotónicos comenzaron los primeros estudios teóricos para encontrar la estructura tridimensional específica en la que se pudieran encontrar efectivamente los gaps de energía prohibidos para ondas electromagnéticas. Los primeros resultados teóricos se hicieron en forma errónea [4], ya que se utilizó una aproximación escalar, muy parecida a la ecuación de onda de Schrodinger, para resolver la ecuación de onda electromagnética y se predecían gaps de energía en donde en realidad no existen en el experimento. El problema de este primer cálculo teórico radica en que cuando se busca la estructura de bandas en cristales fotónicos es necesario tomar en cuenta la naturaleza vectorial de las ecuaciones de Maxwell para plantear la ecuación de onda en forma apropiada.

La primera estructura que en forma exitosa demostró experimentalmente la existencia de gaps de energía prohibidos fue la Yablonovita en 1991 [5]. La Yablonovita es una estructura cúbica centrada en las caras que se obtiene taladrando agujeros en un bloque de material dieléctrico. Esta estructura fue posible fabricarla en el rango de las microondas, pero no en el rango del visible.

Para lograr un cristal fotónico en el rango del visible, han sido propuestos diferentes métodos, como los basados en micro-fabricación, autoensamblado y holografía laser. Muchas estructuras han sido fabricadas en las frecuencias del microonda y en el infrarrojo cercano, pero aun sigue siendo muy difícil fabricar estructuras con bandas prohibidas en el visible [6].

¿Por qué es tan difícil conseguir estructuras con gap completo en el visible? La respuesta es extensa ya que cada estructura tiene sus problemas particulares, sin embargo se puede dar una respuesta en términos generales; la mayoría de las técnicas de fabricación sólo permiten la utilización de materiales de bajo índice de refracción. Se ha demostrado por varios análisis

teóricos que la estructura de bandas con un gap completo sólo podrá existir cuando se pueda construir un cristal fotónico con una modulación en su índice de refracción más grande que 2 [7]. Hasta el momento no existe ninguna estructura tridimensional que permita fabricar estructuras con ese índice [6].

Los ópalos artificiales alguna vez se constituyeron como una estructura con la cual se podría lograr estructuras en las que se pudiera conseguir una banda completa en el visible. Sin embargo, estos ópalos se construyen a partir de una técnica de auto ensamblado químico, en donde unas pequeñas esferas de material dieléctrico se organizan en una estructura compacta cúbica centrada en las caras, dejando intersticios de aire. Por mucho tiempo, se pensó en la idea de lograr ópalos inversos, llenando estos intersticios de aire con un semiconductor de alto índice de refracción. El problema con estas estructuras es que existe desorden. En el 2000, Li and Zhang [8] reportaron que un 5% de desorden estructural destruye la banda completa. Hasta las mejores estructuras de ópalo tienen más de esa cantidad de desorden. De esta forma, con los ópalos nunca se ha logrado fabricar una estructura con gap completo en el visible

Es necesario remarcar que el problema no es que nunca se haya logrado una estructura con gap en el visible. Muchas estructuras dan gaps en el visible. Los ópalos naturales dan gaps en el visible y se puede observar el gap a simple vista. El problema es que este gap es unidireccional, en una sola dirección cristalográfica. Usualmente la dirección TL para una estructura cúbica centrada en las caras. El gap completo debe de ser verificado para todas las direcciones del espacio. Eso es un poco difícil, ya que se debe de cribar la estructura y lograr hacer experimentos de reflexión/transmisión para diferentes planos cristalinos o bien, experimentos con variación de ángulo de incidencia. Hasta ahora, ninguna estructura tridimensional ha demostrado lograr un gap completo en el rango del visible.

LA INVESTIGACIÓN ACTUAL EN CRISTALES FOTÓNICOS

Aunque el estudio de los cristales fotónicos comenzó con estructuras tridimensionales en donde se buscaba el gap completo, pronto se introdujo la clasificación de cristales en una (1D), dos (2D) o tres dimensiones (3D). Los cristales fotónicos 3D probablemente han perdido hasta el momento la batalla en cuanto a lograr la construcción de una estructura con gap completo en el visible [6]. Sin embargo, han surgido nuevos fenómenos de gran interés científico, tales como la supercolimación, superprisma, refracción negativa, entre otros fenómenos que están siendo actualmente investigados en estructuras 3D con la idea de desarrollar nuevos dispositivos. Cabe decir en este punto, que el campo de los cristales fotónicos ha dado lugar, de alguna forma, al nacimiento o impulso de nuevos campos, tales como los metamateriales y la plasmónica [9].

Los cristales fotónicos en 2D son estructuras que tienen periodicidad en un plano y permanecen invariantes en la dirección perpendicular al plano. Estos cristales rápidamente mostraron gaps completos en el plano de la periodicidad [10] y

recibieron un gran impulso con Thomas Krauze en 1996 [11], ya que propuso que la mayoría de los dispositivos que se esperaba desarrollar a través de los cristales fotónicos se podían hacer en una geometría 2D. La idea puede explicarse parcialmente si se considera que la tecnología de las tabletas electrónicas que contienen varios circuitos integrados es una "geometría bidimensional". Se propuso entonces que los dispositivos basados en cristal fotónicos sólo necesitarían cristales en 2D y dejar el confinamiento en la dirección perpendicular al plano a estructuras 1D. La idea tuvo un gran impacto. La mayoría de la investigación en cristales fotónicos que se hace actualmente es en estructuras 2D, especialmente aquellas investigaciones relacionadas al desarrollo de circuitos y dispositivos fotónicos.

Los cristales fotónicos en 1D por su parte, ya existían antes de que se les llamara de esa forma. Antes se les llamaba multicapas. Se utilizaban principalmente para hacer espejos, en especial, estructuras de cuarto de onda. En libros clásicos, tales como el Born [12] se presentan métodos de cálculo de reflexión y transmisión de estas estructuras, en particular, el Método de Matriz de Transferencia. A pesar de su larga existencia, las estructuras en 1D siguen siendo importantes en el campo de cristales fotónicos ya que son estructuras sencillas en donde pueden explorarse fenómenos complicados. Por ejemplo, la emisión espontánea [13], los modos de superficie [14] y los estados Tamm. También puede considerarse que cuando se buscaba entender las estructuras metamateriales se comenzó con estructuras en 1D [15]. En nuestra investigación sobre heteroestructuras hemos procedido de la misma manera y hemos desarrollado un amplio estudio de sistemas en 1D, ya que apenas se está explorando las posibilidades de estas configuraciones.

Existe un punto importante que deseamos mencionar. El uso tecnológico de las heteroestructuras electrónicas -el transistor- fue posible gracias a que se logró una manipulación activa mediante un parámetro externo de la estructura de bandas de uno de los materiales. En términos simples, la corriente de electrones que pasa a través de la heteroestructura puede ser controlada a partir de una corriente de electrones externa. Para el caso de los cristales fotónicos, no queda muy claro cómo va a ser posible manipular mediante un parámetro externo la estructura de bandas. Si el parámetro externo que modifica la estructura de bandas es la temperatura [16] o una inyección de portadores [17], estos mecanismos son muy lentos para el desarrollo de dispositivos fotónicos activos. Incluso la sintonización con cristales líquidos puede considerarse como un mecanismo lento [18]. Lo que se necesita es la manipulación de luz con luz y hasta este momento, esa manipulación sólo parece posible a través de fenómenos no-lineales.

EL ESTUDIO DE HETEROESTRUCTURAS

Las primeras heteroestructuras fotónicas tridimensionales fueron basadas en ópalos artificiales [18] y diversas técnicas de micro-maquinado. Desde entonces ha existido un buen número de trabajos experimentales acerca del tema, aunque existen pocos trabajos teóricos [19]. Al parecer, las técnicas de fabricación de ópalos artificiales se adapta muy bien a la producción de heteroestructuras. Sin embargo, la heteroestructura de ópalo hereda los inconvenientes de los ópalos artificiales: el desorden [8]. Dado que el gap aprovechable del ópalo sólo existe en una dirección, no se ve muy claro en qué forma las heteroestructuras de ópalo puedan ser superiores a las heteroestructuras en 1D. Por otra parte, las heteroestructuras obtenidas por técnicas de micro maquinado parecen ser muy difíciles de construir [20]. Una estructura de micro maquinado, debido a las limitaciones técnicas, usualmente es fabricada con pocos periodos. Las estructuras de bajo índice y pocos periodos dan como resultado pobres propiedades ópticas.

En la práctica se exige la construcción de un gran número de celdas unitarias. La investigación sobre heteroestructuras en 2D, con la idea de obtener gaps gigantes es escasa. Sin embargo, recientemente se han reportado estructuras bidimensionales de bajo índice de refracción fabricadas con técnicas de silicio poroso [21] en donde sería pertinente realizar estudios para buscar ensanchamiento de la banda prohibida similares a los que hemos realizado en los cálculos en estructuras 1D.

Las heteroestructuras unidimensionales han sido más extensamente estudiadas. El primer trabajo que reporta un análisis sobre heteroestructuras unidimensionales fue realizado por H. Miyazaki et al en 1996 [22] analizando las posibilidades de localización de campo electromagnético. El primer trabajo en donde se busca un gap gigante en una heteroestructura fotónica fue realizado en 1998 por J. Zi et al en 1998 [23]. En este trabajo se estudió la superposición de los gaps de dos redes diferentes, pero ambas de alto contraste dieléctrico. En el 2000, estos mismos autores extendieron el estudio de heteroestructuras al caso de múltiples redes cristalinas [24]. En ese mismo año aparecieron los primeros resultados experimentales que reportaban la fabricación de heteroestructuras fotónicas, en particular, fabricadas con la técnica de silicio poroso. Desde entonces, se ha desarrollado una gran cantidad de artículos de investigación en el campo de heteroestructuras fotónicas unidimensionales, entre los cuales se encuentran los que se describen a continuación.

LAS APORTACIONES DE NUESTRO GRUPO

Nuestra investigación ha sido apoyada por tres proyectos del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), se han realizado tres tesis de Maestría en estos temas y actualmente está por finalizar una tesis de doctorado. Se han publicado más de 10 artículos en este tema.

Algunos resultados destacados se enumeran a continuación:

- En la Referencia [25] se presenta una forma detallada para calcular la estructura de bandas en un cristal fotónico.
- En la Referencia [26] presentamos una forma de calcular la velocidad de grupo de un cristal fotónico por medio de un cálculo directo de la estructura de banda.
- En la Referencia [27] presentamos un método que desarrollamos para estudiar heteroestructuras que están construidas con materiales de alto índice de refracción basado en el cálculo de una supercelda, en donde, debido a la complejidad de la estructura de bandas, buscamos la forma en la que la velocidad de grupo pudiera ayudarnos

a discriminar la existencia de un gap gigante.

- En la Referencia [34] presentamos un método para crear un gap gigante para heteroestructuras de bajo índice de refracción.
- En la Referencia [28] se considera la optimización de un gap omnidireccional también para el caso de heteroestructuras de bajo índice de refracción.

Actualmente estamos trabajando para diseñar una heteroestructura con un gap gigante para ondas elásticas y de sonido. Existieron además algunos trabajos que no los hemos incluido en este resumen [29] [30] [39], pero que exploran otros aspectos interesantes de heteroestructuras fónicas.

BIBLIOGRAFÍA

1. E. Yablonovitch, *Physical Review Letters* 58, 2059 (1987).
2. V. P. Bykov, *Soviet Physics JETP* 35, 269 (1972).
3. J. Joannopoulos, R. Meade y J. Winn, "Photonic Crystals", Editorial Wiley, New York (1995).
4. S. Satpathy, Z. Zhang y M. R. Salehpour, *Physical Review Letters* 64, 1239 (1990).
5. E. Yablonovitch, K. M. Leung, *Physical Review Letters* 67, 2295 (1991).
6. T. Zhai, D. Liu y X. Zhang, *Frontiers of Physics in China* 5, 266 (2010).
7. Y. C. Zhong, *Applied Physics Letters* 87, 061103 (2005).
8. Z. Li y Z. Zhang, *Physical Review B* 62, 1516 (2000).
9. S. Zouhdi, A. Vinogradov, "Metamaterials and Plasmonics: Fundamentals Modelling and Applications", Editorial Springer-Verlag, New-York (2008).
10. M. Plihal y A. Maradudin, *Physical Review B* 44, 8565 (1991).
11. T. F. Krauss y S. Brand, *Nature* 383, 699 (1996).
12. M. Born, *Principles of Optics*, Editorial Wiley, New York (1999).
13. J. Manzanares-Martinez y P. Castro-Garay, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications* 24, 1867 (2010).
14. F. Ramos-Mendieta y P. Halevi, *Journal of the Optical Society of America B* 14, 370 (1997).
15. D. R. Smith, *Physical Review B* 65, 195104 (2002).
16. J. Manzanares-Martinez, F. Ramos-Mendieta y P. Halevi, *Physical Review B* 72, 035336 (2005).
17. J. Manzanares-Martinez, F. Ramos-Mendieta y P. Halevi, *Applied Physics Letters* 87, 101110 (2005).
18. S. G. Romanov, *Journal of Physics: Condensed Materials* 12, 8221 (2000).
19. Q. Yan, *Langmuir* 24, 1796 (2008).
20. Y. Li y X. Ki, *Applied Physics A* 99, 117 (2010).
21. R. J. Martin-Palma, *Applied Physics Letters* 89, 053126 (2006).
22. H. Miyazaki, Y. Jimba y T. Watanabe, *Physical Review A* 53, 2877 (1996).
23. J. Zi, J. Wan y C. Zhang, *Applied Physics Letters* 73, 2084 (1998).
24. C. Zhang, *Journal of Applied Physics* 87, 3174 (2000).
25. R. Archuleta-García, M. B. Manzanares-Martinez, J. Manzanares-Martinez, *Revista Boliviana de Física* 13, 79 (2007).
26. R. Archuleta-García, J. Manzanares-Martinez, *Superficies y vacío* 21, 18 (2008).
27. R. Archuleta-García, B. Manzanares-Martinez y J. Manzanares-Martinez, *Revista Mexicana de Física* 53, 371 (2007).
28. J. Manzanares-Martinez, R. Archuleta-García, P. Castro-Garay, D. Moctezuma-Enriquez, Manzanares-Martinez M. B., Urrutia-Banuelos E., enviado al *Optics Express* (septiembre, 2010).
29. J. Manzanares-Martinez, P. Castro-Garay, R. Archuleta-García, D. Moctezuma-Enriquez, enviado al *Superficies y Vacío* (septiembre, 2010).
30. J. Manzanares-Martinez, R. Archuleta-García, D. Moctezuma-Enriquez, *Latin American Journal of Physics Education* 4, 320 (2010).

FORMACIÓN DE BURBUJAS Y CASCARONES ALREDEDOR DE ESTRELLAS DE ALTA MASA

BRENDA PÉREZ RENDON, ALFREDO SANTILLÁN, GUILLERMO GARCÍA SEGURA Y LILIANAHERNÁNDEZ CERVANTES

Las burbujas estelares son estructuras gaseosas de gran belleza y complejidad que rodean a estrellas que tienen una masa mucho mayor que la del Sol. Dichas estructuras estelares son producto de una combinación del medio que se encuentra entre las estrellas y del material que expulsa la estrella misma en forma de viento estelar. En este artículo describimos de forma básica, la física que hace posible la formación de estas estructuras, así como la necesidad que actualmente tiene la astronomía moderna de recurrir a simulaciones numéricas para estudiar detalladamente la formación de estas nebulosas.

DRA. BRENDA PÉREZ RENDÓN.
Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora.
brenda@cajeme.cifus.uson.mx

DR. ALFREDO SANTILLÁN.
Dirección General de Cómputo y Tecnologías de la Información y Comunicación, UNAM.
alfredo@astro.unam.mx

DR. GUILLERMO GARCÍA SEGURA,
Instituto de Astronomía, UNAM, Sede Ensenada.
ggs@astrosen.unam.mx

M.I. LILIANA HERNÁNDEZ CERVANTES,
Instituto de Astronomía, UNAM, Ciudad Universitaria.
liliana@astro.unam.mx

INTRODUCCIÓN

El espacio entre las estrellas contiene cantidades significativas de materia muy diluida, compuesta principalmente de gas (átomos, moléculas, iones y electrones), polvo, rayos cósmicos y campos magnéticos, el cual está diseminado entre las estrellas de forma inhomogénea, a menudo mostrando marcados contrastes en densidad y temperatura. Este conjunto de elementos es conocido como medio interestelar (MIE) y puede manifestarse en diferentes longitudes de onda tal como lo muestra la Figura 1. Para los estándares terrestres, el MIE es extremadamente tenue: en la vecindad del Sol, en promedio la densidad en masa es de aproximadamente un átomo de hidrógeno por centímetro cúbico, lo cual es menor por 20 órdenes de magnitud que el valor más bajo de la atmósfera terrestre (1). Lejos de considerar estas densidades tan bajas como “vacío” este gas es el responsable de una gran cantidad de procesos físicos en nuestra galaxia que van desde la formación de nuevas estrellas hasta la acumulación de material en intrincadas estructuras dinámicas, algunas de las cuales son fácilmente visibles con la ayuda de los telescopios. Estas estructuras gaseosas generalmente son esculpidas y alimentadas por los poderosos vientos estelares de estrellas de alta masa, y brillan como consecuencia de su interacción con la radiación proveniente de las estrellas.

LAS ESTRELLAS MASIVAS Y SUS VIENTOS

El viento estelar es un flujo de partículas que es eyectado por la atmósfera de las estrellas de forma continua. Es un mecanismo muy eficiente por el cual las estrellas pierden masa e inyectan energía mecánica en el medio que las rodea. Nuestro Sol pierde masa en una tasa de aproximadamente 10-14 masas solares por año, lo que implica que si esta tasa fuera constante durante toda su vida, el Sol tardaría 100 billones de años (1014 años) en evaporarse como consecuencia de la pérdida de masa de su viento. La velocidad del viento solar es en promedio de 500 km/s en la vecindad de la Tierra, alcanzando una densidad promedio menor a 10-30 g/cm³ (2). En este flujo de viento solar está embebido nuestro planeta y el resto del sistema solar. Sin embargo, la pérdida de masa del Sol es muy modesta si se compara con los poderosos vientos estelares de estrellas de mayor masa, que son los responsables de moldear de forma dramática las regiones que las rodean. En comparación con el Sol, estas estrellas tienen tasas de pérdidas de masa que son cientos de miles de veces mayores y sus velocidades son de cuatro a cinco veces más grandes. Debido a esto, las estrellas masivas ejercen un fuerte impacto en la estructura y evolución del universo a través de la huella que imprimen en el MIE que las rodea. Su corto tiempo de vida provoca que afecten “rápidamente” su entorno, pues a diferencia del Sol las estrellas de mucha masa viven pocos millones de años y son la principal fuente de supernovas que inyectan gran cantidad de energía al medio circumestelar (MCE), junto con elementos químicos procesados en el interior de las estrellas antes y durante la explosión, en uno de los eventos más extremos que se dan en el universo.

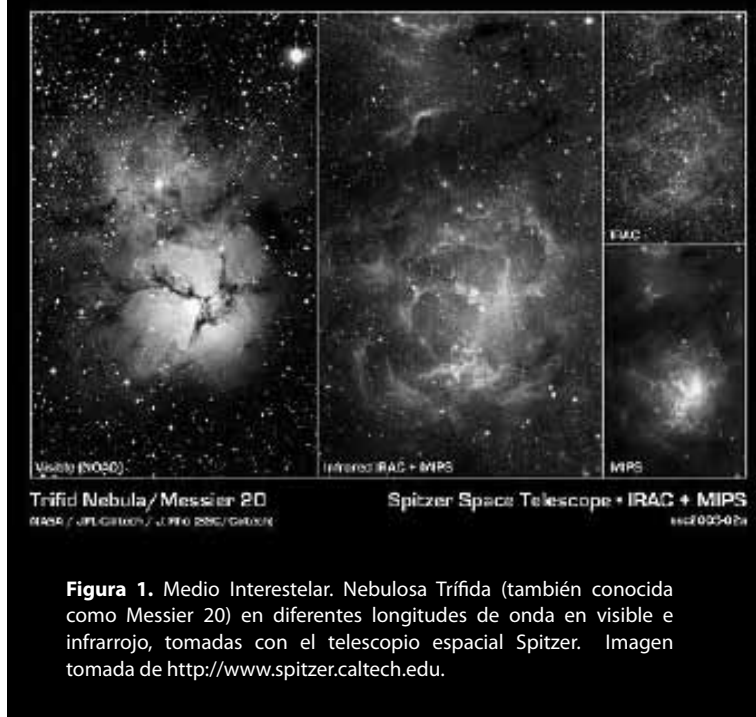


Figura 1. Medio Interestelar. Nebulosa Trífida (también conocida como Messier 20) en diferentes longitudes de onda en visible e infrarrojo, tomadas con el telescopio espacial Spitzer. Imagen tomada de <http://www.spitzer.caltech.edu>.

Definimos una estrella masiva como aquella que al formarse tiene una masa mayor a 9 masas solares (3). Su evolución está determinada por la cantidad de material y composición química iniciales, donde ambas condiciones establecen cuánto del hidrógeno que dispone puede ser utilizado como combustible para producir reacciones termonucleares, modificando la composición química de la estrella. Las reacciones termonucleares producen energía en el interior de la estrella que es radiada hacia el espacio exterior, en forma de luz y calor. En las estrellas masivas la nucleosíntesis estelar (quemado de elementos) se da en el núcleo a través de un proceso cíclico donde cada vez se van produciendo elementos más pesados a partir de otros ligeros, que servirán de combustible para la siguiente etapa de quemado. Las estrellas con masas mayores a 11 masas solares pasan por seis etapas de quemado nuclear sucesivas en su núcleo: Hidrógeno ► Helio ► Carbono ► Neón ► Oxígeno ► Silicio de forma no-degenerada (4), cada una de las cuales se enciende a una temperatura y densidad características. Durante la secuencia principal, una de las etapas más estables y de mayor duración, aproximadamente 90% de la vida total de una estrella, se transforma en su interior hidrógeno en helio. Cabe señalar que el Sol se encuentra actualmente en esta etapa de evolución.

BURBUJAS ESTELARES

En la secuencia principal las estrellas masivas pierden una gran cantidad de masa a través de sus poderosos vientos, que impactan directamente sobre el MCE modificándolo química y dinámicamente. El comportamiento de ésta interacción depende de diversos factores como la velocidad, temperatura y masa del viento, las inhomogeneidades locales y/o el gradiente de densidad del MCE, el flujo de fotones ionizantes de la estrella, la tasa de enfriamiento del gas, los procesos de transferencia de calor y evaporación de masa, la presencia de campos magnéticos, etc. En algunos casos, la energía depositada en el MIE por los

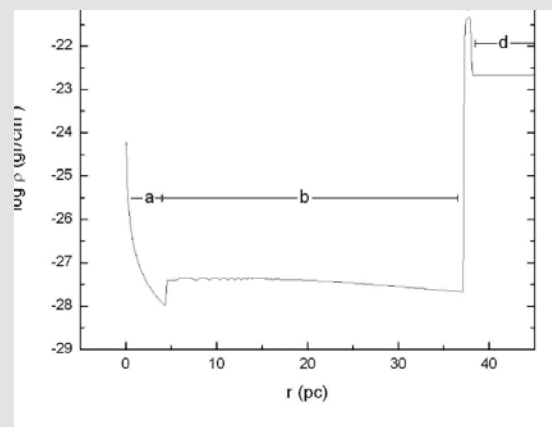
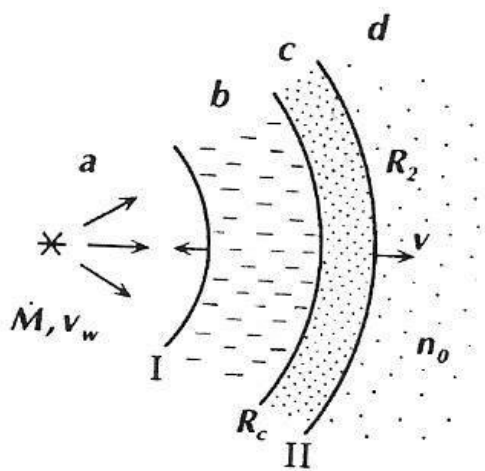


Figura 2. La formación de una burbuja y un cascarón de MIE barrido por un viento estelar. Izquierda. La zona [a] es donde el viento de la estrella se expande libremente. En [b] tenemos una burbuja de viento chocado de alta temperatura y desacelerado, que se expande por el aumento de presión térmica. La región [c] corresponde al cascarón formado por gas barrido del MIE. I y II son los frentes de choque en reversa y directo, respectivamente. La figura fue adaptada de (13). Abajo: Gráfica unidimensional de la densidad contra posición ($\log \rho$ vs. r) al final de secuencia principal en la estrella de muy alta masa (30 masas solares), obtenida con modelos numéricos nuestros. Pueden identificarse cada una de las zonas esquematizadas en la figura arriba.

vientos estelares da lugar a la formación de burbujas estelares. En la Figura 3 puede verse un ejemplo de este efecto; la Nebulosa de la Burbuja que se trata precisamente de una estructura creada por la interacción de los vientos estelares de estrellas masivas con el medio que las rodea.

Realizar un estudio completo que incluya todas las variables de los vientos hace que el problema se vuelva muy complejo y que no pueda resolverse de forma analítica. Para conocer con mayor detalle la dinámica de la interacción del viento con el MCE es necesario recurrir a simulaciones numéricas que frecuentemente utilizan poderosas herramientas de cómputo. Los primeros intentos, antes de que hubiera computadoras suficientemente capaces para resolver el problema en toda su complejidad, fueron hechos de forma analítica proponiendo un escenario muy simplificado que sólo arroja soluciones aproximadas al problema real. No obstante, estas soluciones analíticas son muy útiles a la hora de comprender la física básica de la interacción, así como, para confrontar y entender los resultados numéricos. Por ésta razón, antes de presentar nuestros resultados numéricos discutiremos brevemente las soluciones analíticas encontradas por otros autores. En primera aproximación se propone un escenario idealizado: un viento estelar fuerte y homogéneo que interactúa con un medio de densidad uniforme y constante que rodea a la estrella, el cual como ya hemos mencionado tiene muy baja densidad, del orden de $10\text{-}100 \text{ part/cm}^3$. Estos primeros escenarios simplificados fueron explorados por primera vez en las soluciones analíticas de Pikel'ner (1968) que obtienen una primera solución ideal. En su modelo, un poderoso viento estelar barre una cavidad en el medio interestelar que la rodea. La configuración resultante de este proceso ésta esquematizada en la Figura 2 (izquierda) que muestra la configuración del medio circunestelar que da lugar a la formación de una burbuja. A la derecha de la misma Figura 2 se muestran los resultados de nuestro modelado numérico. En la cavidad barrida por el viento estelar éste se expande libremente (región [a] de la Figura 2) y el viento finaliza

en un choque terminal que lo desacelera y produce una burbuja de viento chocado y caliente (región [b]). La presión térmica de la burbuja caliente barre el MCE que la rodea y forma un cascarón denso de gas interestelar (zona [c] de la Figura 2). Otro tipo de soluciones analíticas autosimilares también fueron obtenidas por Weaver et al. (5) quienes resolvieron la dinámica del MCE durante las etapas adiabáticas iniciales, las etapas intermedias radiativas y las avanzadas en la evolución, donde incorporan conducción de calor y la evaporación de material de una región a otra y obtienen soluciones unidimensionales que no involucran inestabilidades dinámicas. En sus soluciones pueden identificarse tres etapas "ideales" (5) que se detallarán a continuación.

ETAPAS DE LA FORMACIÓN DE CASCARONES Y BURBUJAS ESTELARES

1) Etapa de expansión adiabática. El viento inicial que emite la estrella en secuencia principal interacciona directamente con un medio interestelar de densidad constante. La evolución es tan rápida que las pérdidas radiativas son despreciables y el sistema se expande prácticamente sin pérdida de energía. El viento libre de la estrella tiene un perfil de densidad que decae con la distancia a la estrella ($\rho \sim r^{-2}$) y que acaba en un choque terminal, representado por un salto en la densidad que separa el viento libre de la estrella (región [a]) de una burbuja de gas caliente chocado (región [b]) que llega a alcanzar temperaturas del orden de millones de grados Kelvin. Dentro de esta burbuja de gas caliente la presión es casi uniforme, como lo son también los valores de velocidad y densidad. Estas son las llamadas "burbujas estelares", regiones de gas chocado por el viento estelar, a muy altas temperaturas. Finalmente, la burbuja de gas chocado se encuentra rodeada por un cascarón de gas interestelar barrido, cuya posición externa se expande en el medio interestelar. La energía mecánica inyectada por el viento se distribuye de diferente forma en cada



Figura 3. Nebulosa de la Burbuja, en la constelación de Casiopea. La figura muestra una burbuja de gas caliente y el cascarón que la rodea producido por los intensos vientos de la estrella central (BD+60°2522). Cabe señalar que el cascarón que rodea a la estrella brilla en luz visible debido a la radiación proveniente de la estrella central, así como la región fotoionizada donde esta embebida la burbuja. Copyright: © Croman.

región, donde 5/11 partes del total corresponden a la región [b], casi toda en forma de energía térmica, ya que, la energía cinética es prácticamente nula. La otra parte se haya contenida en el cascarón externo: 40 % en forma de energía cinética y 60% en forma de energía térmica. Esta etapa es de muy corta duración, típicamente del orden de miles años.

2) Etapa radiativa. En la segunda etapa, las pérdidas radiativas de la región [c] se vuelven comparables a las de la energía inyectada por el viento y el proceso de enfriamiento causa que el cascarón se vuelva visible en el óptico. Las condiciones para que el material de un cascarón sea detectable es que alcance una densidad mayor a $1.67 \times 10^{-24} \text{ gr/cm}^3$. La masa del cascarón externo está determinada por la cantidad de gas barrido. La Nebulosa de la Burbuja (Figura 3), situada hacia la constelación de Casiopea, se trata precisamente de una burbuja estelar formada por este proceso.

3) Colapso de la burbuja. En la tercera etapa, la región [b] empieza a enfriarse radiativamente y la burbuja también colapsa dejando que el viento de la estrella interaccione directamente con el cascarón externo. Sin embargo, los cálculos en (5) indican que durante la mayor parte de la vida de la estrella la luminosidad radiativa es menor que la mecánica por lo que comúnmente esta última etapa no se observa alrededor de las estrellas.

MODELANDO NUMERICAMENTE LA FORMACIÓN DE CASCARONES Y BURBUJAS

Las soluciones autosimilares de (5) no incluyen muchas situaciones físicas presentes en los cascarones reales. Por ejemplo, la mayoría de las estrellas masivas de tipo espectral o generalmente ocurren en cúmulos de estrellas que están muy cercanas unas de otras y el MCE de una es fuertemente afectado por el de sus vecinas. O bien, hay estrellas en movimiento supersónico con respecto al medio que las rodea, que producen un choque de proa que modifica la estructura del cascarón

estelar (6). Además de éstos, hay otros procesos físicos que no pueden tratarse sólo con soluciones analíticas autosimilares.

Al igual que sucedió en el campo de la evolución estelar, con la aparición de procesadores matemáticos cada vez más potentes, recientemente se ha puesto especial énfasis en la simulación numérica de la interacción del viento estelar y su entorno incluyendo nuevos escenarios físicos, y calculando no solamente soluciones unidimensionales, sino en dos y tres dimensiones. Diversos autores han utilizado la simulación numérica para el estudio de cascarones circumestelares (7), (8) que incluyen inhomogeneidades en densidad, inestabilidades, vientos episódicos, flujos de masa, etc. Todos los estudios concuerdan con que los cascarones creados durante la secuencia principal son estables aunque muy grandes y difusos por lo que prácticamente no hay detección observacional de ellos.

Las soluciones analíticas de Weaver et al. (5) sólo describen el comportamiento del MCE cuando es afectado únicamente por un viento uniforme sin aceleración. Sin embargo, en la mayoría de las estrellas masivas las características del viento estelar son variables y se modifican a medida que la estrella evoluciona en su ciclo de vida. Así pues, hay que considerar la velocidad del viento variable y en consecuencia, su luminosidad mecánica que también varía. La evolución subsecuente que será descrita a continuación es resultado de una gran cantidad de estudios que involucran simulaciones numéricas y que tratan de describir estas etapas de evolución.

a) Cascarones vinculados a Supergigantes Rojas.

Generalmente, después de secuencia principal una estrella masiva evoluciona hacia la etapa de supergigante roja (SGR) donde su radio se incrementa dramáticamente hasta alcanzar dimensiones de centenas de radios solares y su temperatura superficial decae drásticamente a un valor de aproximadamente 3000 K. En las supergigantes rojas la tasa de pérdida de masa es mucho mayor que en secuencia principal y el viento es lento y denso. Durante esta etapa, la pérdida de masa por vientos es

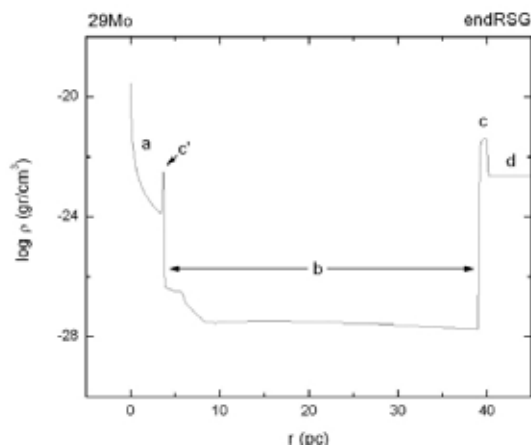
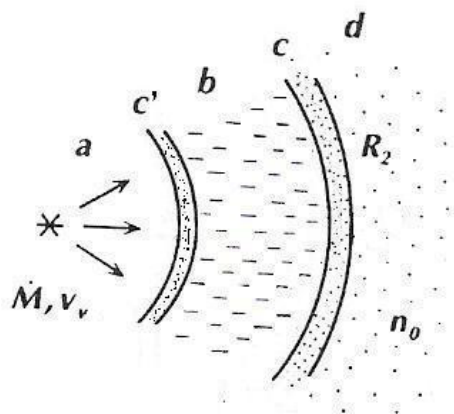


Figura 4. Izquierda: La formación del cascarón SGR dentro de la burbuja de secuencia principal. Las etiquetas son las mismas que en la Figura 2, donde añadimos la zona [c] correspondiente al cascarón SGR que está separado del cascarón de secuencia principal por la región [b] de viento chocado. La distancia entre los dos cascarones no está a escala. Nótese que el viento de SGR interacciona directamente con el cascarón que forma. Derecha: Gráfica unidimensional de la densidad contra posición ($\log \rho$ vs. r) al final de SGR de una estrella de 30 masas solares), obtenida con modelos numéricos nuestros. Pueden identificarse los dos cascarones y el resto de las zonas esquematizadas en la figura de la izquierda.

tan grande, que la estrella llega a perder hasta un 60% de su masa inicial. Este nuevo viento lento interactúa con el medio esquematizado en la Figura 2. Después de secuencia principal, el viento libre de la supergigante roja se topa con la burbuja de gas chocado que es menos densa cuando todavía está en su fase adiabática (región [b] de la Figura 2) y forma una sub-estructura de cascarón con el viento de supergigante roja. En la región [c] de la Figura 4 puede verse una representación esquemática de la formación de este nuevo cascarón (izquierda). Como la creación de este cascarón resulta de la interacción de un viento lento después de uno rápido (el de secuencia principal), no hay burbuja chocada de viento de SGR ya que el viento denso interacciona y forma directamente el nuevo cascarón, por lo que durante la etapa de supergigante roja de una estrella masiva tenemos dos cascarones densos separados por una región menos densa y caliente de viento chocado de secuencia principal, como se esquematiza en la Figura 4. El radio de este segundo cascarón mas interno (de ahora en adelante, cascarón SGR) está determinado por la duración de la estrella en la etapa de supergigante roja y por el balance entre la presión dinámica del viento de SGR y la presión térmica del gas chocado originada durante la vida de la estrella en la secuencia principal, es decir, el tamaño de este cascarón dependerá fuertemente de la tasa de pérdida de masa en SGR, de la velocidad del viento, de la densidad de la burbuja chocada de secuencia principal y de su temperatura. Al inicio de la formación del cascarón SGR la presión dinámica del viento es menor que la presión térmica de la burbuja, ocasionando que la frontera interna de la burbuja se mueva hacia dentro hasta que las presiones se igualan y el cascarón alcanza su posición de equilibrio produciendo cascarones pequeños de supergigante roja, que son hidrodinámicamente estables (9). La posición final del cascarón SGR también dependerá de otros parámetros como puede ser la conducción térmica entre cascarones, etc.

Un ejemplo de este cascarón SGR puede ser el que rodea a la estrella de Betelgeuse en la constelación de Orión. Actualmente

se considera que Betelgeuse es una estrella muy masiva, de aproximadamente 20 masas solares y se encuentra en su etapa de supergigante roja, con un radio que llega a alcanzar alrededor de 900 radios solares. En 1975, A.P. Bernat y D.L. Lambert (10) observaron emisión de una línea de potasio que parece provenir de un cascarón circumestelar que rodea a la estrella. El radio interno de dicho cascarón es de aproximadamente 10 radios de Betelgeuse. Algunas estrellas masivas después de pasar por todos los ciclos de quemado nuclear en su interior producen un núcleo de hierro y explotan como supernovas tipo II, durante su etapa como supergigante roja, como presumiblemente sucederá con Betelgeuse. La explosión y el material estelar eyectado impactará directamente sobre el cascarón SGR formado previamente por la estrella.

b) ¿Qué pasa con las estrellas muy masivas?

Cuando las estrellas son más masivas que las descritas en la sección anterior, siguen una evolución posterior a la de supergigante roja, que dependerá de su masa inicial, metalicidad, etc. Cuando las estrellas nacen con masas superiores a 20-25 masas solares, después de pasar por la etapa de supergigante roja, la estrella evoluciona nuevamente hacia un estado de menor radio y mayor temperatura aumentando la velocidad del viento (~ 500 km/s). Algunas de estas estrellas que se encuentra en la etapa de supergigante azul (SGA), finalmente explotan como supernova tal como ocurrió en el caso de 1987A (11). Otras estrellas después de la etapa de supergigante roja se transforman directamente en estrellas tipo Wolf-Rayet (WR), que son estrellas masivas (con masas mayores a 20-30 masas solares), de muy altas temperaturas y que se encuentran en etapas muy avanzadas de su evolución. Se caracterizan principalmente por sus fuertes vientos estelares a través de los cuales pierden una gran cantidad de masa. Dependiendo de el subtipo, muestran intensas líneas en emisión de hidrógeno y helio ionizado, e incluso carbono, nitrógeno y/o oxígeno. En la etapa WR la estrella se despoja de su envoltente de hidrógeno a través de un viento muy masivo

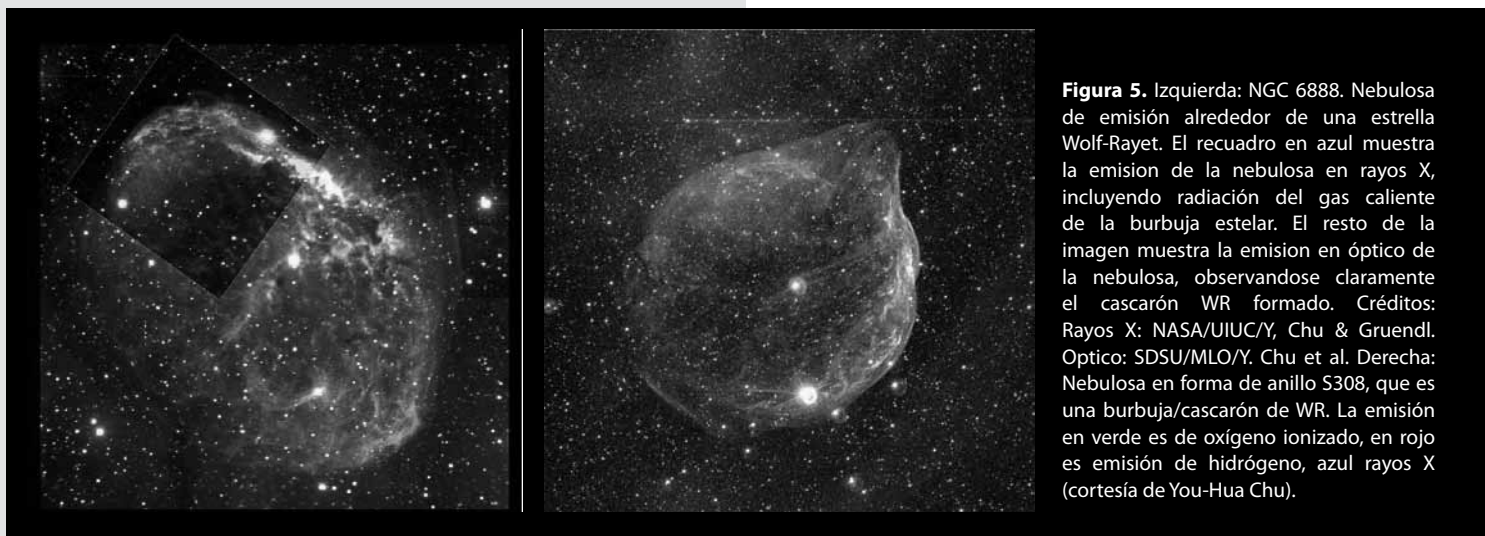


Figura 5. Izquierda: NGC 6888. Nebulosa de emisión alrededor de una estrella Wolf-Rayet. El recuadro en azul muestra la emisión de la nebulosa en rayos X, incluyendo radiación del gas caliente de la burbuja estelar. El resto de la imagen muestra la emisión en óptico de la nebulosa, observándose claramente el cascarón WR formado. Créditos: Rayos X: NASA/UIUC/Y. Chu & Gruendl. Optico: SDSU/MLO/Y. Chu et al. Derecha: Nebulosa en forma de anillo S308, que es una burbuja/cascarón de WR. La emisión en verde es de oxígeno ionizado, en rojo es emisión de hidrógeno, azul rayos X (cortesía de You-Hua Chu).

y rápido (del orden de 2000 km/s) que impacta sobre el MCE que ha sido modificado por las etapas de secuencia principal y supergigante roja.

Independientemente de que la estrella se convierta en SGA o WR, se genera nuevamente un viento rápido que forma un nuevo cascarón dentro del viento de lento de SGR. Durante esta tercera etapa se forma un tercer cascarón (que llamaremos cascarón azul cuando es formado por el viento de SGA y cascarón WR cuando es formado por el viento de WR). La formación y dinámica de estos cascarones es muy compleja y ha sido tratada de forma numérica por nuestro equipo de trabajo (12). La velocidad del tercer cascarón es significativamente más grande que la de viento y que la del cascarón de SGR, por lo que se expande más rápidamente y colisiona con éste último. Las circunstancias y consecuencias de esta colisión pueden ser encontradas en (9). En la Figura 5 se muestran 2 ejemplos de burbujas estelares, NGC 6888 y la S308, que presentan cascarones de gas alrededor de estrellas Wolf-Rayet.

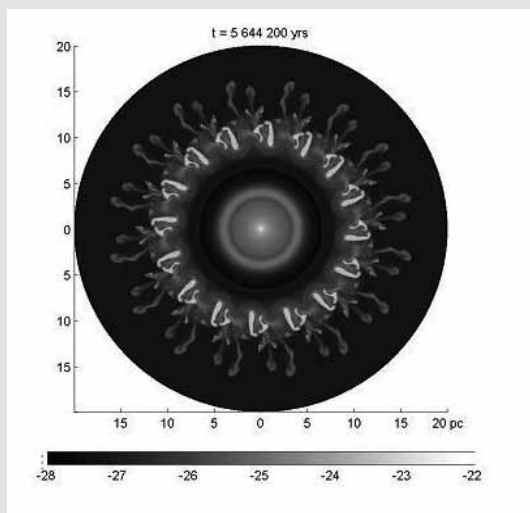


Figura 6. Simulación numérica de un cascarón formado alrededor de una estrella Wolf-Rayet. La imagen muestra en niveles de gris el logaritmo de la densidad (g/cm^3) del material que rodea a la estrella antes de que estalle como supernova. Puede observarse la posición del cascarón de WR a una distancia de aproximadamente 10 pc (32.6 años luz), el cual resulta fragmentado debido a la acción de inestabilidades dinámicas en el gas circunestelar.

Por otro lado, en la Figura 6 presentamos un ejemplo de los resultados de una de nuestras simulaciones numéricas vinculados a la formación de varios cascarones en 2D, que son parte de nuestros esfuerzos por entender la cinemática y dinámica alrededor de estos cascarones. Pueden observarse dos estructuras de burbuja/cascarón alrededor de una estrella Wolf-Rayet, situada en el centro de la figura. Estas estructuras son objetos celestes relativamente escasos debido a la corta duración de su vida y al hecho de que provienen de estrellas masivas que no son las mas comunes en nuestra galaxia. Sin embargo, su observación nos provee de una oportunidad única de estudiar estos raros objetos, lo cual incluye confrontar las características observadas con el modelado numérico que se realiza para explicar su naturaleza. Este campo de estudio en la astronomía es actualmente un campo muy dinámico, que cambia conforme vamos adquiriendo y desarrollando mayores herramientas de cómputo que han resultado indispensables para el estudio de éste y muchos otros fenómenos astronómicos.

Agradecemos a los proyectos CONACyT 104651, Intercambio UNAM-UNISON U38P170 y DGAPA-UNAM IN121609 el apoyo brindado.

BIBLIOGRAFIA

1. Ferriere, K.M. 2001. *Rev. Mod. Phys.* 73, 1031.
2. Lang, K.R. 2001. *The Cambridge Encyclopedia of the Sun*. Cambridge University Press.
3. Iben, I. Jr., Renzini, A. 1983, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 21, 271.
4. Kippenhahn, R., Weigert, A. 1990, *Stellar Structure and Evolution*. Berlin: Springer.
5. Weaver, R., McCray, R., Castor, J., Shapiro, P., Moore, R. 1977, *ApJ*, 218, 377
6. Chevalier, R.A., Liang, E.P. 1989, *ApJ*, 344, 332
7. Brighenti, F., D'Ercole, A. 1995, *MNRAS*, 277, 53
8. García-Segura, G., MacLow, M.M. 1995, *ApJ*, 455, 145.
9. García-Segura, G., Langer, N., Mac Low, M.M. 1996, *A&A*, 316, 133.
10. Bernat, A.P., Lambert, D.L. 1975, *ApJ Lett* 201, L153.
11. Arnett, W.D., Bahcall, J.N., Kirshner, R.P., Woosley, S. 1989 27, 629.
12. Pérez-Rendón, B., García-Segura, G., Langer, N. 2009, *A&A*, 506, 1249
13. Lozinskaya, T. 1992

**EQUILIBRANDO UNA ESCOBA:
CONCEPTOS BÁSICOS DE LA TEORÍA DEL CONTROL**

EL PÉNDULO INVERTIDO

HORACIO MUNGUÍA AGUILAR, OSWALDO ESPINOZA VALENCIA

Se describe el problema de equilibrar una escoba (mantenerla vertical) en el marco del problema más general conocido como control de un péndulo invertido. Se presenta el análisis teórico de este problema y se describe la construcción de un prototipo en el Laboratorio de Electrónica del Departamento de Física con fines esencialmente didácticos. Se hace énfasis en la presentación del concepto de estabilidad y en la naturaleza de la técnica de control conocida como PID.

HORACIO MUNGUÍA AGUILAR
Correo: hmunguia@correo.fisica.uson.mx

OSWALDO ESPINOZA VALENCIA
Departamento de Física, Universidad de Sonora

INTRODUCCIÓN

En las diversas áreas de la ingeniería se presentan ciertos tipos de problemas que podríamos llamar arquetipos ya que sirven para ilustrar conceptos, técnicas y procedimientos en una forma particularmente clara e integral. Uno de estos arquetipos en ingeniería eléctrica/mecánica lo es el problema del control de un péndulo invertido. Este tipo de péndulo, que tiene una variedad de presentaciones, se le puede encontrar en diversos sistemas de la vida cotidiana. Uno de los más conocidos es el relativo al juego de mantener la vertical de una escoba invertida apoyada sobre la palma de la mano (figura 1). Es bien sabido que esto se logra mediante los desplazamientos rápidos y oportunos de la posición de la mano en la dirección por donde se aprecia que la escoba se inclina. Esta habilidad solo se consigue con un poco de práctica y solo en el caso de que la escoba no sea muy corta.

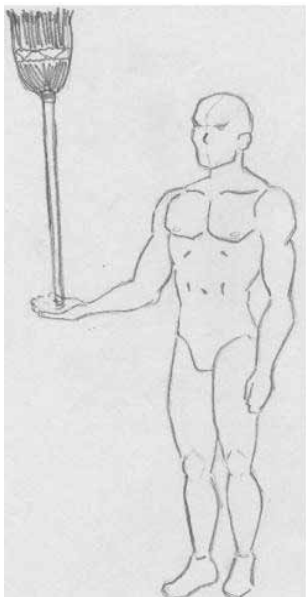


Figura 1 Equilibrando una escoba

A nivel laboratorio, el sistema de péndulo invertido más sencillo que se puede construir consiste de una varilla anclada sobre una superficie en un punto de apoyo sobre el cual la varilla puede girar en un plano. La superficie o móvil puede desplazarse en la dirección coplanar al plano de giro de la varilla. Para lograr la vertical, al móvil se le debe de aplicar una fuerza con la magnitud y dirección adecuada que contrarreste la tendencia de la varilla a caer. Véase la figura 2.

En las siguientes líneas trataremos de explicar primero en qué consiste el problema del péndulo invertido y sus aspectos centrales. Enseguida se analiza la dinámica del sistema, es decir, aplicamos las leyes de la mecánica para determinar con precisión cómo es el comportamiento del sistema bajo ciertas condiciones. Después se explica con cierto detalle cómo se implementa un

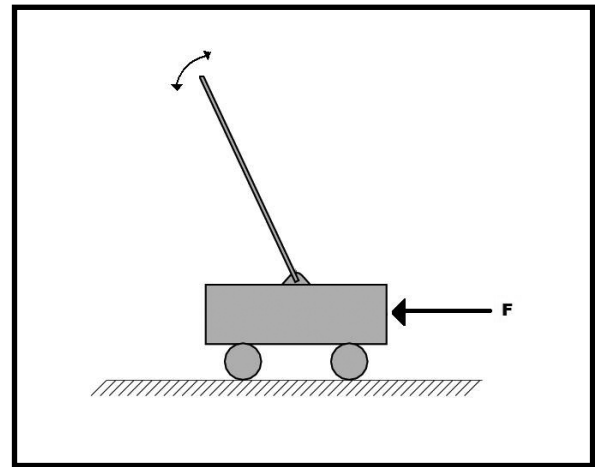


Figura 2 Péndulo invertido sobre móvil y la fuerza F

controlador en base a la información de la dinámica del sistema. Posteriormente se describe cómo se construyó un modelo real. Finalmente se abunda un poco más sobre diversos aspectos del controlador del péndulo invertido.

EL PROBLEMA DEL CONTROL

Puesto que implementar un control automático para equilibrar una escoba equivale a desarrollar un control para un péndulo invertido, nuestro enfoque es analizar y construir un modelo de péndulo invertido en la forma de una varilla giratoria tal como la que aparece en la figura 2.

Para desarrollar un mecanismo automático que permita controlar esta varilla (péndulo) se requieren tres cosas esenciales:

- Una forma continua de medir el ángulo del péndulo respecto a la vertical.
- Un móvil impulsado por un mecanismo con una fuerza variable.
- Un procedimiento que relacione, de alguna forma, la fuerza del mecanismo impulsor con la posición y velocidad del péndulo. Este es un procedimiento de retroalimentación ya que la variable de salida, en este caso el ángulo, modifica a la variable de entrada, la fuerza impulsora.

Intuitivamente parecería claro que con desplazar el móvil en la dirección opuesta al ángulo del péndulo éste podría mantener el equilibrio. Esto lo hacemos, más o menos, al controlar la escoba invertida. Sin embargo, en un sistema de control automático tenemos que determinar con toda precisión la cantidad de impulso que el sistema tiene que aplicar al móvil en todo instante. Se debe disponer de una fórmula o relación que le permita al sistema determinar la cantidad del impulso aplicado. Cuando equilibramos la escoba, el cerebro "calcula", de algún modo, la cantidad de impulso que debemos aplicar en la mano para lograr el equilibrio. Esta cantidad no es constante pues varía dependiendo cómo se "siente" la escoba. El éxito no se logra sino después de cierto entrenamiento que le permitan al cerebro, nervios y músculos probar diferentes técnicas de equilibrio. Ciertamente no podríamos describir con precisión cuál es este

algoritmo que el cerebro emplea. Es algo que a la conciencia le queda muy difuso.

Existen varias técnicas para determinar la regla o algoritmo que un sistema automático puede seguir para controlar con éxito un sistema. El método clásico, que enseguida mostramos, requiere conocer en detalle la dinámica del sistema. Esto es, partiendo de las características del sistema (masa, dimensiones, etc.) y de las leyes de la física que lo rigen, tratar de predecir el comportamiento del sistema ante determinados estímulos. Teniendo esta información podemos intentar alguna estrategia cuantitativa- o sea, que se pueda expresar matemáticamente- y evaluarla teóricamente para anticipar su resultado. Por lo tanto, lo primero que se tiene que averiguar es cómo varían la posición y velocidad del péndulo y del carro cuando éste último se suelta a partir de un ángulo inicial Φ y se somete a una cierta fuerza F .

DINÁMICA DEL SISTEMA

En la figura 3 se muestra el esquema de fuerzas que actúan sobre el sistema y que permitirán estudiar su dinámica.

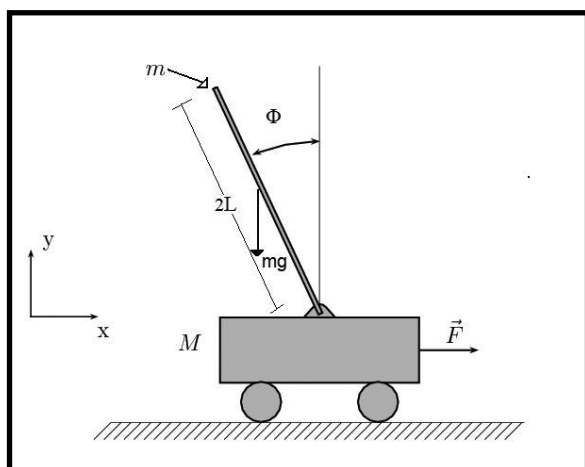


Figura 3 Parámetros y esquema de fuerzas del sistema

Las variables y parámetros del sistema son:

X: Posición horizontal.

Y: Posición vertical

Φ : Ángulo de la varilla respecto a la vertical

2L: Longitud total de la varilla

M: Masa del móvil (carro)

m: Masa de la varilla

F: Fuerza aplicada al móvil

La descripción de la posición y velocidad de la varilla y el móvil se obtiene al aplicar las leyes de Newton al sistema. Las ecuaciones que se generan considerando pequeñas desviaciones angulares [1] son:

$$F = (m + M) \frac{d^2 x}{dt^2} + mL \frac{d^2 \varphi}{dt^2}$$

$$mgL\varphi - mL \frac{d^2 x}{dt^2} = (J + mL^2) \frac{d^2 \varphi}{dt^2}$$

En donde $J = mL^2/3$ es el llamado momento de inercia de la varilla y g es la gravedad. Estas ecuaciones diferenciales lineales describen cómo se mueven el carro y el péndulo si conocemos sus condiciones iniciales, es decir, la posición y velocidad del péndulo y el carro en un momento inicial dado. Se obtienen al sumar las componentes horizontales y verticales de las fuerzas y las torcas que actúan en el sistema. Son ecuaciones lineales de segundo orden cuya solución se puede obtener por métodos clásicos o cuya simulación se puede hacer en computadora por medio de programas como MATLAB. Por supuesto, la naturaleza de la fuerza aplicada F es crucial en la forma de respuesta que tendrá el sistema. Y es aquí justamente en donde tenemos que aplicar la idea del control automático. Como se mencionó al principio, la idea básica para poder controlar el péndulo (o la escoba) consiste en aplicar una fuerza en la dirección contraria a la dirección en que va cayendo el péndulo. En nuestro problema el carro sólo se puede desplazar en la dirección del eje X y, por la forma en que se articula el péndulo, éste sólo puede rotar en el plano X-Y. Esto simplifica la acción de control porque para mantener la posición vertical del péndulo sólo tenemos que desplazar el carro en la dirección del eje X: en sentido positivo o en sentido negativo. El único problema es determinar qué tanto se debe desplazar el carro para lograr el objetivo del control. Y cómo la posición del carro la determina la fuerza F aplicada, el problema se resume en la pregunta: ¿De qué magnitud debe ser F para lograr el control del péndulo?

EL CONTROLADOR

Existen varias respuestas a esta pregunta pero la más simple, y quizás obvia, es la de hacer que la magnitud de F sea proporcional al ángulo del péndulo Φ pero con signo contrario. Es decir

$$F = -k\Phi$$

Esto es lo que se conoce con el nombre de control proporcional. La siguiente pregunta obligada es: ¿Esto es suficiente para lograr la verticalidad del péndulo? La única forma de responder adecuadamente a esta pregunta es analizar matemáticamente el sistema incorporando la ecuación (3) a las ecuaciones (1) y (2) y resolver para $\Phi(t)$. Antes de seguir procede una observación: si la posición inicial de la varilla es perfectamente vertical ($\Phi=0$) entonces la fuerza aplicada será cero y la varilla permanecerá indefinidamente equilibrada. Esto es, por supuesto, en la teoría. En la práctica sabemos que cualquier pequeño disturbio la sacará de su posición. Por lo tanto, para ser más realista, se supondrá que inicialmente la posición de la varilla es diferente de $\Phi=0$. De ahí en adelante el sistema buscará la posición de equilibrio.

No entraremos en los detalles de cómo resolver las ecuaciones

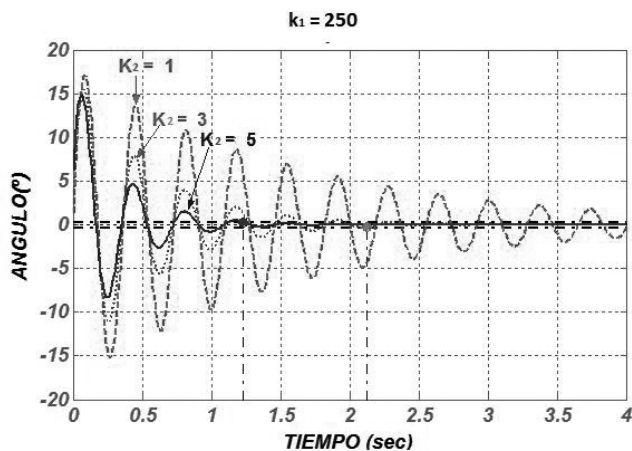


Figura 4 Respuestas de la varilla al control proporcional

1, 2, y 3. Solo mencionaremos que en la teoría del control se acostumbra emplear la Transformada de Laplace [2] para analizar y resolver estas ecuaciones. En particular, con esta técnica se desarrolla el concepto de Función de Transferencia [3] que permite visualizar los rasgos generales del comportamiento del sistema. Para este caso particular se puede demostrar [1] que se tienen tres tipos de respuestas diferentes dependiendo del valor particular de la constante k . Para el rango de $k < g(M+m)$ la fuerza es demasiado débil para sostener el equilibrio de la varilla y esta cae. Para el rango de $k > g(M+m)$ la fuerza es demasiado grande y la varilla oscila alrededor de la vertical. Solo en el caso de que k sea exactamente igual a $g(M+m)$ la varilla se mantendrá en la posición inicial del ángulo. De hecho, si la posición original no es cero, ésta se mantendría indefinidamente. En la gráfica de la figura 4 se observan las curvas de respuesta correspondientes a estos tres casos.

El tercer caso en el que $k = g(M+m)$ es impracticable. Cualquier desviación, por pequeña que sea, nos llevará a alguno de los otros casos. Por lo tanto, podemos concluir que para una fuerza como la de la ecuación (3) el sistema es inestable y no se puede lograr la verticalidad de la varilla. Puede quedar la impresión de que aumentando el valor de k la varilla pudiera alcanzar la vertical. Pero intuitivamente podemos ver porqué no es así: para grandes valores de k la recuperación de la varilla será tan rápida que se nos irá en la dirección contraria; para cuando cambie de signo la fuerza, la varilla reaccionará en dirección contraria pero con demasiada rapidez. El resultado neto es que la varilla oscilará rápidamente alrededor de la vertical un cierto ángulo que no disminuirá con el tiempo.

MEJORANDO EL CONTROLADOR

En el anterior intento por controlar el péndulo hemos pasado por alto un detalle que no es obvio pero que tiene lógica: nos estamos preocupando únicamente por aplicar una fuerza de recuperación que sólo depende del tamaño del ángulo Φ , que es el error entre el ángulo deseado (0 grados) y el ángulo actual; no estamos tomando en cuenta la velocidad angular con la que va cayendo la varilla, o sea $d\Phi/dt$. Por ejemplo, si la varilla está desviada de la vertical un ángulo pequeño pero la velocidad con la que está cayendo es grande, la fuerza F será pequeña y

no anticipará que pronto aumentará la desviación. Un instante posterior el error se habrá incrementado y ya no recuperará lo ganado. Podemos mejorar la información sobre la fuerza modificando la relación (3) para que incluya un término de velocidad. La nueva propuesta quedaría así:

$$F = (k_1\phi + k_2 \frac{d\phi}{dt})$$

En esta nueva relación la magnitud de la fuerza F depende tanto de la desviación Φ como de la velocidad angular $d\Phi/dt$. Los factores de peso son k_1 y k_2 que se conocen como constante proporcional y constante derivativa respectivamente y a la relación (4) se le conoce como controlador proporcional + derivativo o simplemente controlador PD. Queda la cuestión de qué valores les podemos dar a estas constantes. En la teoría del control lo que se analiza es la forma que en que se modifica la función de transferencia del sistema con el agregado del controlador PD a fin de escoger los mejores valores de k_1 y k_2 que satisfagan las especificaciones requeridas. Equivalentemente, se puede incorporar la ecuación (4) con las ecuaciones (1) y (2) y buscar los valores de las constantes que produzcan un sistema estable, si es que los hay, por supuesto. Afortunadamente las ecuaciones se pueden resolver por métodos clásicos ya que son lineales y de segundo orden. Al hacerlo, se puede demostrar [3] que la solución para Φ produce un sistema estable si se cumplen las condiciones $k_2 > 0$ y $k_1 > Mg$.

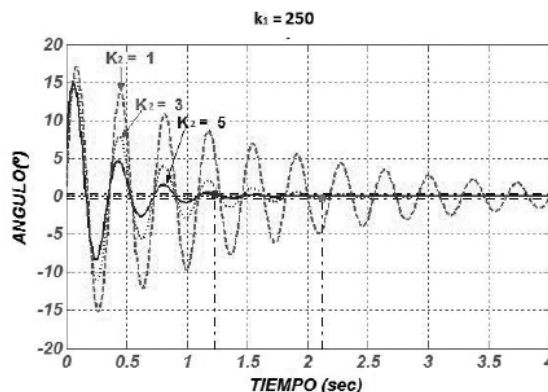


Figura 5 Respuesta del sistema con control PD

En la figura 5 se aprecia como es la respuesta del sistema para valores de $k_1 = 250$ y diferentes valores de k_2 .

Se aprecia que el sistema sigue produciendo oscilaciones pero, a diferencia del sistema proporcional, ahora las oscilaciones se amortiguan conforme pasa el tiempo. Entre mayor es el valor de k_2 más rápido se amortiguan. Esto es, la varilla tiende a la vertical más rápidamente.



UN MODELO REAL

En la práctica, la construcción de un péndulo invertido y su correspondiente sistema de control presenta una gran variedad de dificultades. La principal tiene que ver con la forma en que se genera la fuerza F con las características de la ecuación (4). En el Laboratorio de Electrónica del Departamento de Física hemos empleado un carrito eléctrico de juguete impulsado por un pequeño motor con su transmisión integrada para construir el modelo del péndulo invertido. Desmantelamos la carrocería dejando solo el chasis como plataforma para soportar la varilla/péndulo. En su base la varilla se articula al eje de un sensor de posición tipo incremental que se encuentre sujeto al chasis del carro y que sirve para medir el ángulo ϕ . Véase la figura 6.

Sobre el mismo chasis se localiza el circuito que se diseñó para efectuar la acción de control PD. Este circuito, basado en un microcontrolador, lee constantemente el sensor de posición de la varilla y así determina ϕ y $d\phi/dt$ en todo momento. Con estos valores y empleando un algoritmo para el cálculo de la ecuación (4) determina el voltaje que debe aplicar al motor del carro. Este voltaje está directamente relacionado con la fuerza F por lo que la acción de control se completa.

El modelo construido presenta el inconveniente del deslizamiento o patinaje de las ruedas sobre el piso; esto degrada la acción de control. Pudimos resolver el problema, hasta cierto punto, utilizando una cubierta de plástico rugoso sobre el piso formando una pista por donde el carro efectúa sus desplazamientos. Otras aproximaciones más eficientes en este aspecto emplean rieles con bandas de tracción para mover el carro [4], [5]. Obviamente, esto introduce complicaciones mecánicas y limita el espacio de operación.

MÁS SOBRE EL CONTROL

Una pregunta natural es si existe otra expresión diferente de la ecuación (4) que permita obtener resultados satisfactorios, es decir, que produzca un sistema estable. La respuesta es que hay muchos. Nada más que el control PD es, para este sistema, el más sencillo de todos. Una de las modificaciones que se le pueden hacer a la expresión (4) es agregarle un término que incluya la integral del ángulo ϕ con una cierta constante de proporcionalidad. Esto da origen a un controlador muy empleado en sistemas de control llamado control PID. De hecho, nuestro controlador es de este tipo pero con la constante de la integral igual a cero. Normalmente este término sirve para disminuir el error de la variable de salida cuando se alcanza el estado estable.

En principio, cualquier cambio es factible hacer al controlador y estudiar sus efectos en la estabilidad del sistema. El problema es que cuando las ecuaciones diferenciales que caracterizan al sistema son de mayor orden, el análisis del sus comportamiento es más complicado y su implementación física también lo es. Por ejemplo, en nuestro caso del péndulo invertido, si incorporamos el efecto del motor del carro en el sistema, a las ecuaciones (1) y (2) habrá que agregarles otra ecuación diferencial de segundo orden que incluye las variables de torque y corriente eléctrica; con esto el sistema se convierte en uno de orden cuarto que complica bastante su análisis. No se debe de olvidar que estas ecuaciones son válidas para valores pequeños de ϕ , del orden de 200 o menos. En caso contrario, las ecuaciones se convierten en



Figura 6 El carro con el péndulo invertido

no lineales y las técnicas de control mencionadas no funcionan adecuadamente.

Existen diferentes aproximaciones al problema del control de sistemas cuando estos son muy complicados o se desconocen sus ecuaciones características. Una de las más exitosas es la conocida con el nombre de control difuso [6] que se acostumbra emplear cuando se tiene información empírica sobre el comportamiento del sistema sin necesidad de conocer el detalle de su estructura interna.

CONCLUSIONES

El problema de mantener equilibrada una escoba con la palma de la mano ilustra muy bien el problema técnico del control de un péndulo invertido. Se han mostrado los detalles de cómo implementar un control automático para este sistema que permiten comprender mejor los conceptos de retroalimentación, control proporcional y control derivativo. Se ha mostrado como es indispensable conocer la dinámica del sistema para escoger los parámetros correctos del controlador. La implementación física de un péndulo invertido utilizando un móvil en una dimensión (como el desarrollado en nuestro laboratorio) es un clásico experimento que se puede emplear en un curso formal de teoría de control. Los detalles técnicos de su construcción y los cálculos involucrados aportan elementos didácticos de gran valor.

BIBLIOGRAFÍA

1. Elgerd Olle I, Control Systems Theory, McGraw-Hill ISE, Tokyo, 1967.
2. Spiegel Murray R, Ecuaciones Diferenciales Aplicadas, 3a Edición, Prentice-Hall, México, 1983.
3. Ogata Katsuhiko, Modern Control Engineering, Prentice Hall, New Jersey 1997.
4. Stang John, The inverted pendulum, Cornell University Engineering Division, Design Project Report, May 2005
5. Medrano-Cersa, G.A, Robust computer control of an inverted pendulum, IEEE Control Systems Magazine, Vol. 19, No. 3, Junio 1999.
6. Wang Li-Xin, A Course In Fuzzy Systems and Control, Prentice-Hall, 1996



DISEÑO Y ELABORACIÓN DE PROTOTIPO SEGUIDOR SOLAR DE DOS GRADOS DE LIBERTAD PARA CELDAS SOLARES FOTOVOLTAICAS

GUSTAVO JESÚS OZUNA HUERTA, MARÍA ELENA ANAYA PÉREZ, NUN PITALUA DÍAZ,
CARLOS ANAYA EREDIAS

El presente artículo propone y evalúa mediante simulación matemática, un sistema difuso de seguimiento solar con el objetivo de lograr el correcto posicionamiento de una celda solar fotovoltaica y así obtener la mayor cantidad de luz solar durante el día y por lo tanto producir la mayor cantidad de energía eléctrica. Los resultados de la primera fase de la investigación muestran el comportamiento de los motores de corriente directa con respecto a los sensores propuestos para desarrollar esta función. Esta propuesta es una alternativa en la mediana generación de energía eléctrica para satisfacer la demanda de electricidad en casa habitación o comunidades rurales de forma sustentable.

ING. GUSTAVO JESÚS OZUNA HUERTA
gozuna@industrial.uson.mx

M.C MARÍA ELENA ANAYA PÉREZ
meanaya@industrial.uson.mx

DR. NUN PITALUA DÍAZ
meanaya@industrial.uson.mx

M.C CARLOS ANAYA EREDIAS
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Sonora

INTRODUCCIÓN

El presente artículo es un producto del proyecto de la investigación “Diseño y Elaboración de Prototipo Seguidor Solar de Dos Grados de Libertad Para Celdas Solares Fotovoltaicas” en el cual se propone un mecanismo para eficientar la captación de energía solar mediante el posicionamiento de una celda solar con respecto al sol, el cual en su primera fase se modeló el control de este dispositivo matemáticamente con algoritmos de control difuso, que permiten garantizar el correcto posicionamiento del panel fotovoltaico durante el día, y asegurar la máxima captación solar para producir mayor cantidad de energía eléctrica. Los algoritmos de control posicionan el panel de este a oeste siguiendo la trayectoria aparente del sol y de norte a sur posicionándolo en el cambio de estaciones en el año, como se muestra en la Figura 1.

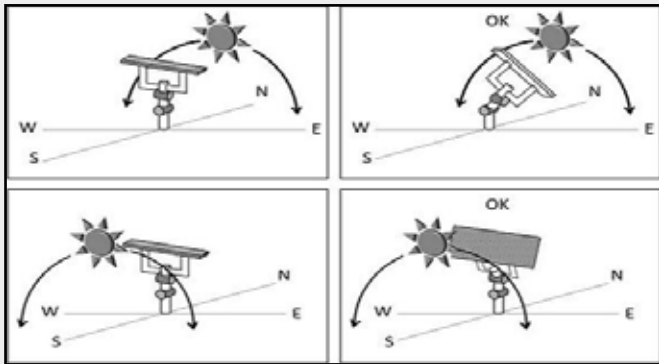


Figura 1. Posiciones del sol y del panel solar

El objetivo de la investigación es mostrar una alternativa más en el seguimiento solar desarrollada totalmente en el campus y mostrar la viabilidad de ésta por simulación matemática. La estructura del siguiente artículo muestra la problemática a resolver, seguida del diseño del prototipo, el modelado del motor de corriente continua que utilizará el prototipo, el sistema de control y los resultados de la simulación, así como la propuesta electrónica por parte del equipo de investigación que da pie a la segunda fase de este proyecto de investigación.

PROBLEMÁTICA

Hoy en día podemos observar a varias disciplinas que buscan desarrollar sistemas sustentables de transformación de energía y que abordan el problema de varios puntos de vista para lograr una producción mas limpia. Las celdas solares fotovoltaicas que podemos observar en la ciudad están instaladas fijas y captan en su mayoría los rayos del sol de medio día. Además en el mercado hay diferentes alternativas de seguimiento solar para celdas fotovoltaicas como el sistema de posicionamiento global, utilizando controladores lógicos programables y mediante computadora utilizando LabView, el prototipo propuesto busca ser una alternativa de bajo costo.

PROTOTIPO

En el sistema mostrado en la Figura 2 se necesita posicionar ambos motores, para asegurar el correcto seguimiento del panel solar en cualquier posición del sol con respecto al Este-Oeste o Norte-Sur. Los 2 motores que se utilizan son de corriente directa, con la siguiente aplicación:

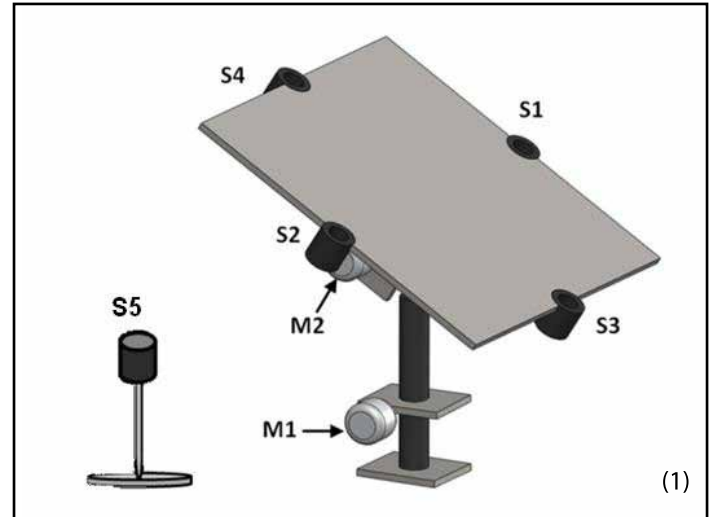


Figura 2. Seguidor solar con sensores

M1: Motor 1 → Posición horizontal (Norte-Sur, Sur-Norte)

M2: Motor 2 → Posición vertical (Este-Oeste, Oeste-Este)

Estos son modelados matemáticamente con las siguientes ecuaciones: [4], [5]

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_{app}}{L} - \frac{R}{L}i - \frac{K_b}{L}\omega$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{K_t}{J}i - \frac{b}{J}\omega$$

Donde V_{APP} es el voltaje aplicado, R es la resistencia eléctrica, L es la inductancia, b es la fricción, J es el momento de inercia para el motor y $K\Phi$ es la constante del campo electromagnético representados en la Figura 3.

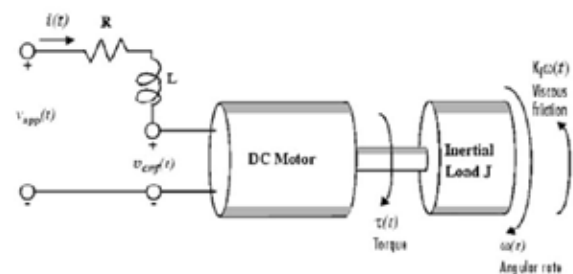


Figura 3. Motor DC

Además para el sistema se están considerando 5 sensores codificados de la siguiente manera:

- S1 → Este
- S2 → Oeste
- S3 → Sur
- S4 → Norte
- S5 → Día o Noche

Estos sensores foto resistivos sólo permiten pasar un determinado voltaje que va desde los 0 volt hasta los 5volts dependiendo de la cantidad de luz solar que les llegue, logrando con ello valores continuos. El quinto sensor S5, sólo es sensible a la radiación solar e indica si es de noche o de día.

CONTROL

Para el control se propone utilizar un controlador difuso debido a que éste emula aceptablemente el razonamiento humano y podrá tomar decisiones a partir de datos imprecisos [2]. Se pretende utilizar un Microcontrolador en el cual se programen las reglas difusas y así poder posicionar el panel fotovoltaico en los cuatro puntos cardinales como lo muestra la Figura 1

Las ecuaciones del motor DC así como las entradas de voltaje por parte de los sensores fueron simuladas por medio de MATLAB y Simulink lo cual es representado en la Figura 4. Para

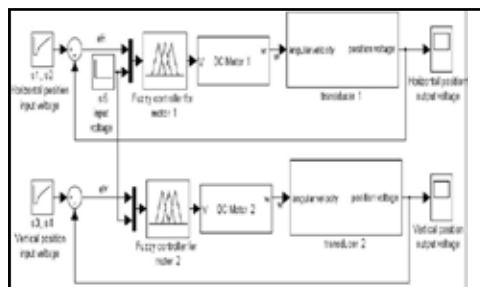


Figura 4. Sistema de control de posición para el adecuado seguimiento del sol en Simulink

el sistema de control se utilizan los dispositivos de entrada S1 y S2 para el sistema de control de posición del motor 1, S3 y S4 para el sistema de control de posición del motor 2 y además el sensor S5 el cual detecta la radiación solar y controla los otros cuatro sensores. El Microcontrolador (simulado) realiza las comparaciones de los sensores S1- S2 y S3-S4 para calcular el error y después enviar la señal al motor 1 o motor 2, lo cual es retroalimentado constantemente, mediante la comparación del voltaje de entrada de los sensores para lograr el posicionamiento del panel fotovoltaico, adecuado si el error es cero cuando los sensores S1 y S2 estén recibiendo el mismo voltaje.

Los sensores S3 y S4 trabajan de la misma manera. La posición se determina con la información establecida en las tablas de inferencia difusa (tablas 1 y 2), donde cada regla hace la

comparación entre el sensor S5 y el error horizontal (eH) para el caso del motor 1 y el error vertical (eV) para el motor 2. Las funciones de membresía utilizadas para el sistema de seguimiento solar difuso están representadas en las Tablas 1 y 2:

eH\S5	ON	OFF
NEG	EO	OK
Ok	OK	OK
POS	OE	OK

Tabla 1. Tabla de inferencia difusa para posición horizontal

eV\S5	ON	OFF
NEG	SN	OK
Ok	OK	OK
POS	NS	OK

Tabla 2. Tabla de inferencia difusa para posición vertical

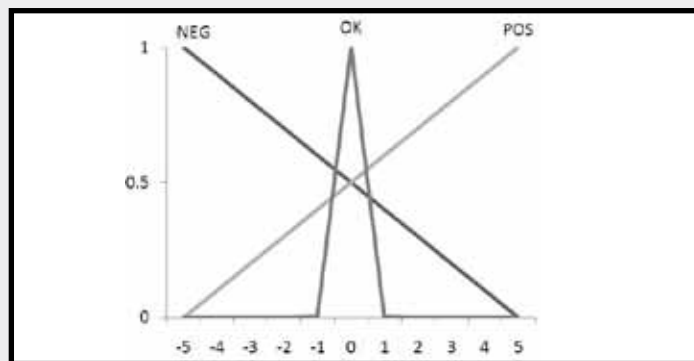


Figura 5. Conjunto difuso de entrada para ambos errores de posición (eH, eV)

En la Figura 5 podemos observar la representación del conjunto difuso del voltaje resultante en eH, donde a cada valor de voltaje de [-5 5], le corresponde un rango [0 1] según sea su pertenencia. Cuando el sistema queda estabilizado en "OK", el sistema de seguimiento recibe en su entrada la misma cantidad de voltaje entre los sensores y por lo tanto la celda fotovoltaica está posicionada correctamente en la trayectoria Este-Oeste. Además el conjunto difuso para eV es similar al utilizado en la figura 5 porque el comportamiento de los errores son parecidos, debido a que los voltajes de entrada en ambos sistemas de control provienen de sensores con el mismo rango de voltaje.

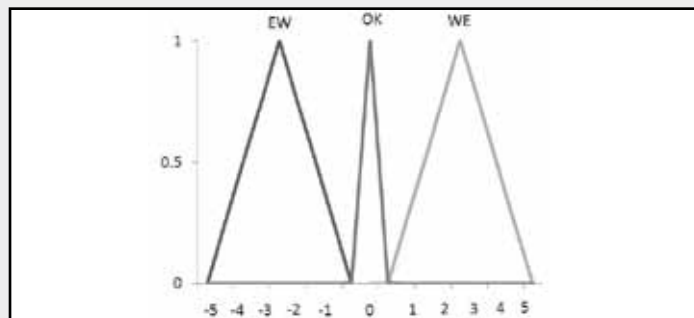


Figura 6. Conjunto difuso de salida para el controlador difuso del motor 1

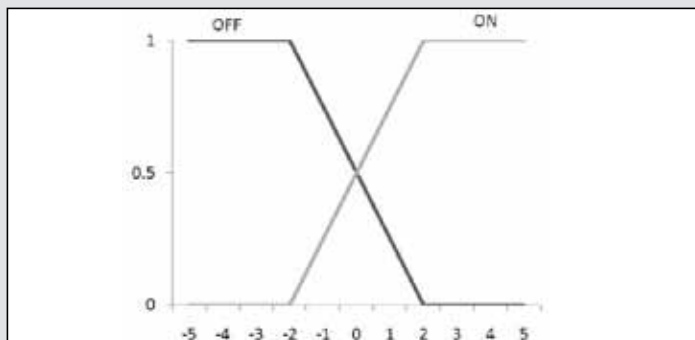


Figura 7. Conjunto difuso de salida del sensor 5

Los conjuntos difusos de salida que se muestran en las figuras 6 y 7, son similares para los motores 1 y 2, puesto que ambos comparten las mismas características mecánicas y eléctricas además de recibir la información por parte de sensores con el mismo comportamiento

En la figura 7 se muestra el conjunto difuso de entrada del sensor S5 el cual es un pirheliómetro y su función es detectar la radiación solar. Este se ubica fuera del sistema, por lo cual se podrían controlar varios sistemas de seguimiento solar difuso a la vez. Cuando es de día S5 toma el valor ON, por lo que los otros sensores empezarán a buscar la máxima luz solar y cuando el sensor S5 está en OFF, los otros sensores dejan de buscar, aunque los sensores del panel detecten otro tipo de luz, por ejemplo de lámparas u otras fuentes luminosas, no serán tomadas en cuenta porque sólo es sensible a la radiación solar, evitando con ésto perdidas de energía durante la noche estando en reposo.

En las tablas 3 y 4 se muestran las reglas de control difuso para el sistema tanto en posición vertical y horizontal.

FUZZY RULES	
1	If (eH is NEG) and (S5 is ON) then (M1 is EW)
2	If (eH is ok) and (S5 is ON) then (M1 is OK)
3	If (eH is POS) and (S5 is ON) then (M1 is WE)
4	If (eH is NEG) and (S5 is OFF) then (M1 is OK)
5	If (eH is ok) and (S5 is OFF) then (M1 is OK)
6	If (eH is POS) and (S5 is OFF) then (M1 is OK)

Tabla 3. Reglas base para el control difuso de posición horizontal

FUZZY RULES	
7	If (eV is NEG) and (S5 is ON) then (M2 is SN)
8	If (eV is ok) and (S5 is ON) then (M2 is OK)
9	If (eV is POS) and (S5 is ON) then (M2 is NS)
10	If (eV is NEG) and (S5 is OFF) then (M2 is OK)
11	If (eV is ok) and (S5 is OFF) then (M2 is OK)
12	If (eV is POS) and (S5 is OFF) then (M2 is OK)

Tabla 4. Reglas base para el controlador difuso de posición vertical

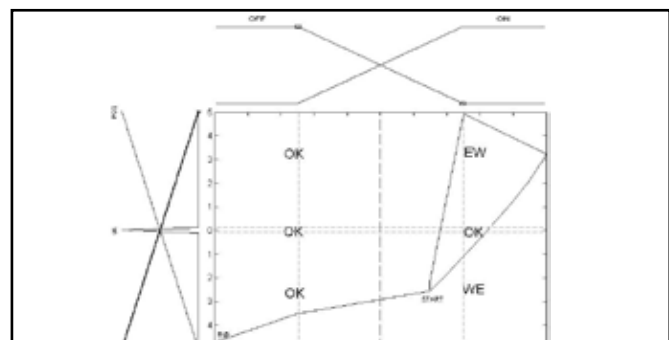


Figura 9. Trayectoria lingüística para la posición horizontal del panel solar

SIMULACIÓN

Para la simulación se representaron los valores de voltaje por medio de 5 vectores como entrada para los sensores S1, S2, S3, S4 y S5 en el sistema representado en la Figura 4 por medio del software SIMULINK perteneciente a la plataforma MATHLAB. La Figura 9 muestra el comportamiento del motor 2 que controla la posición de la celda solar, en la zona WE-EW (Oeste-Este Este-Oeste), donde la posición del panel comienza en la zona WE y luego va en dirección de EW para direccionarse hacia el punto máximo de EW para después regresar a la zona WE terminando en el punto máximo de WE.

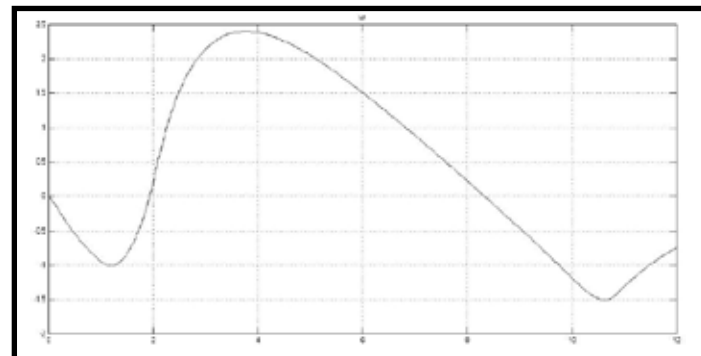


Figura 10. Velocidad angular horizontal en un periodo de 12 hrs

Así mismo, la figura 10 muestra el comportamiento del motor 1, y la posición del panel durante el día y en la zona NS-SN (Norte-Sur Sur-Norte). La gráfica comienza en la zona NS el comportamiento de este vector siempre se mantiene en el rango de [5 - 5] lo cual indica que la trayectoria se va intercambiando de las zonas NS-SN. La cual nos muestra la trayectoria lingüística por medio de zonas de activación en un periodo de 12 hrs. Las Figuras 10 y 11 muestran la velocidad angular horizontal del motor 1 y la velocidad angular vertical del motor 2 en un periodo de 12 hrs [1].

PROPUESTA ELECTRÓNICA

Después de haber realizado las pruebas de simulación del comportamiento de los motores con respecto a los sensores y haber obtenido que el sistema simulado sea estable, el equipo de investigación elaboró la propuesta electrónica, la cual se muestra en la figura 12. Este circuito utiliza el Microcontrolador

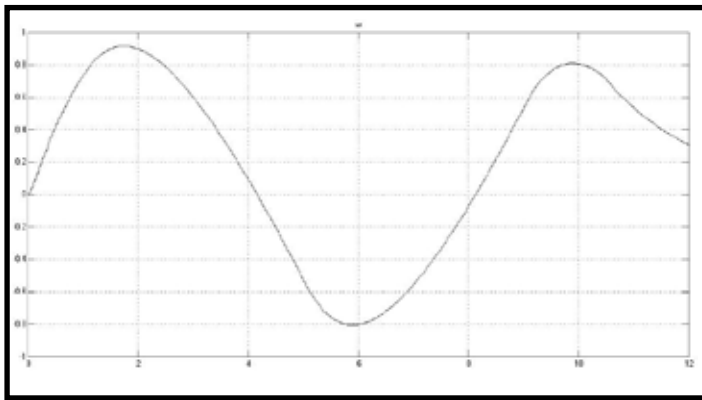


Figura 11. Velocidad angular vertical en un periodo de 12 hrs

PIC 16F628A el cual tendrá programadas las reglas difusas además de ser un Microcontrolador popular de bajo costo.

CONCLUSIONES

El buscar nuevas alternativas para eficientar los sistemas tradicionales de transformación de energía solar en la universidad

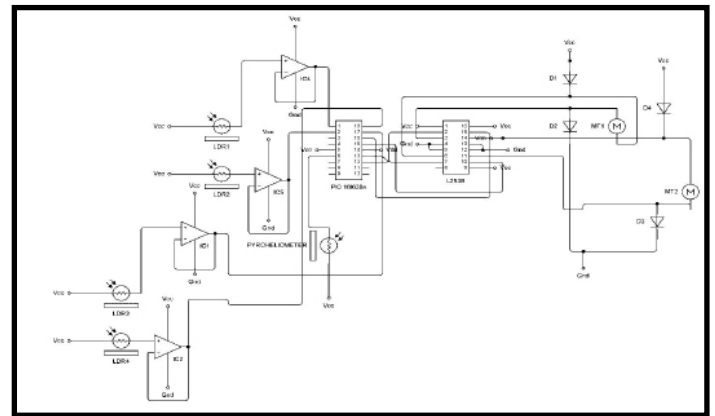


Figura 12. Propuesta electrónica para el seguidor solar

de Sonora, contribuirá al logro de una universidad sustentable comprometida con el medio ambiente. El sistema propuesto es una alternativa económica en la mediana generación de energía eléctrica para satisfacer la demanda de electricidad en aulas, casa habitación o comunidades rurales.



BIBLIOGRAFÍA

1. J. Zhang, J. Xiong,, and Y. Chen, "Self-tuning Fuzzy Control Method Based on the Trajectory Performance of the Phase Plane", Proceedings of the Sixth International Conference for Enhanced Building Operations, Shenzhen, China, November 6 - 9, 2006.
2. K. Passino and S. Yurkovich, Fuzzy Control, Addison Wesley, 1998.
3. W. Elshamy, DC motor model, MATLAB central archives, 2006
4. A. Louchene, A. Benmakhlouf and A. Chaghi, "Solar tracking system with fuzzy reasoning applied to crisp sets", Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°2, Algérie, 2007, pp 231-240.



CAÍDAS EN EL ADULTO MAYOR

FACTORES DE RIESGO QUE REPERCUTEN EN SU ESTADO DE SALUD

BLANCA ESCOBAR CASTELLANOS, MARÍA GPE. MARTÍNEZ MARTÍNEZ, MARIBEL VILLEGAS CASTRO

Las caídas en los adultos mayores (AM) son un problema de salud pública porque se encuentran vinculadas a la discapacidad, a la disminución de la calidad de vida y al incremento del número de años de vida potencialmente perdidos. Además, las lesiones demandan una mayor inversión de recursos económicos, sociales y humanos, la planeación de programas especializados y la redefinición de prioridades en salud.

El presente trabajo permitió identificar los factores de riesgo que contribuyen a que un adulto mayor presente una o más caídas en el curso de su vida, se identificó que los más susceptibles de presentarlas eran los mayores de 75 años. Entre los factores intrínsecos se identificó la pérdida del equilibrio como principal causa. Una minoría mostró riesgo a la marcha identificándose mecanismos de adaptación para la misma, como el uso de aditamentos y aumento de la base de sustentación para deambular. En la valoración del equilibrio-marcha como predictor de caídas se encontró que un porcentaje importante presentaba cinco veces mayor riesgo de caer.

Entre los factores de riesgo extrínsecos, las causas de caídas más frecuentes fueron atribuidas a la presencia de obstáculos y superficies resbaladizas dentro del entorno habitual de la población, sin embargo las caídas se presentaron dentro y fuera del hogar. Además se identificó que la mayoría de la población no cuenta con la cultura de prevención de caídas.

MCE. BLANCA ESCOBAR CASTELLANOS.
Departamento de Enfermería. Universidad de Sonora.
Correo: escobarcblanca@enfermeria.uson.mx

M. ED. MARÍA GPE MARTÍNEZ MARTÍNEZ. Facultad de Enfermería.
Universidad Autónoma de Nuevo León. Correo: mmartinez20@hotmail.co

MCE. MARIBEL VILLEGAS CASTRO.
Departamento de Enfermería. Universidad de Sonora.
Correo: maribelvillegas_72@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

Entre los accidentes, las caídas son la fuente más importante de morbilidad y mortalidad para los Adultos Mayores (AM), convirtiéndose en un grave problema de salud pública, por las lesiones que producen. De los ingresados en el hospital a causa de las caídas, únicamente el 50 % estará vivo al cabo de un año (1). En países desarrollados el 30 % de las personas de 65 años o más que viven en su casa, pueden caer una o más veces por año; este porcentaje se incrementa hasta 50% en los adultos mayores de 80 años. El fenómeno de traumatismos originados por caídas predomina en el sexo femenino en una relación 2.7:1.00 en las edades de 60 a 65 años, pero tiende a igualarse por sexos conforme se incrementa la edad y tiende a ser más frecuente en los varones después de los 85 años (2).

Según la Encuesta Nacional de Salud en México (2000) dentro de las causas de los accidentes, las caídas ocuparon cerca de la mitad de los casos notificados. La prevalencia en las mujeres se incrementó al menos dos puntos porcentuales por cada grupo decenal de edad a partir de los 60 años, pasando de 4.6 % en el grupo de 60 a 69 años, a 6.6 % en el grupo de 70 a 79 años, hasta alcanzar 8.9 % en el grupo de 80 y más años (3).

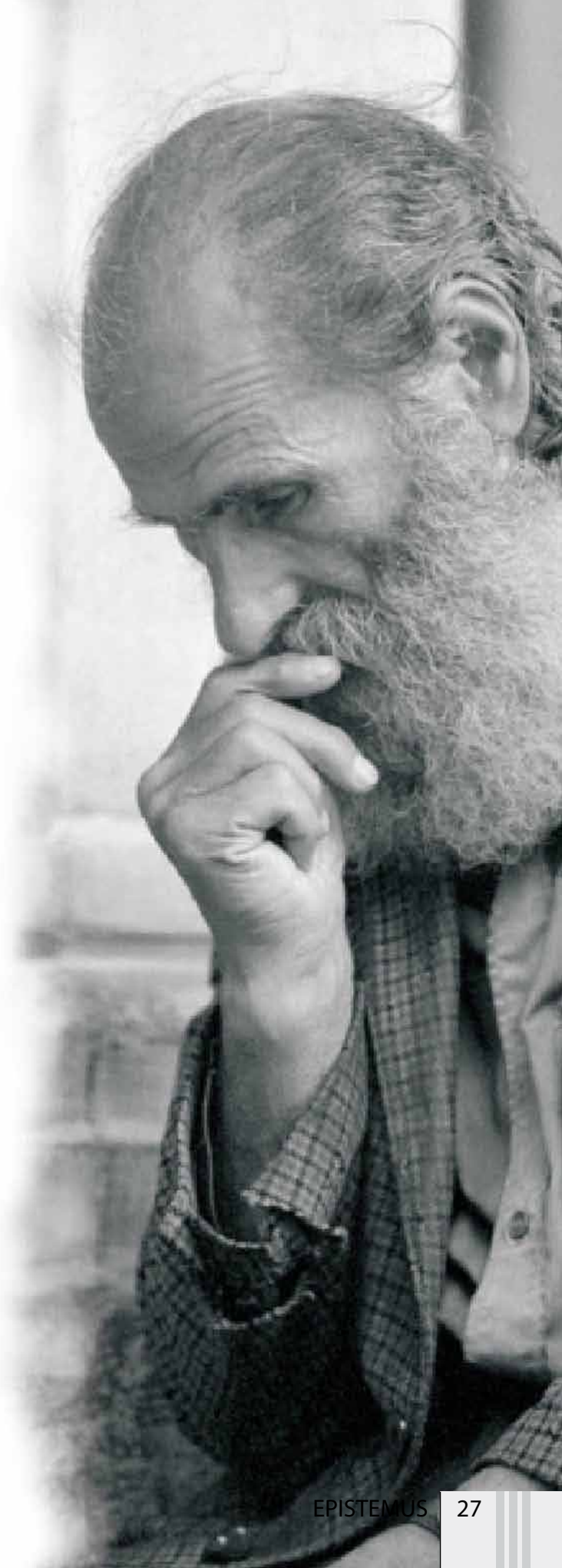
La caída es la consecuencia de cualquier acontecimiento que precipita al individuo al suelo en contra de su voluntad, siendo la etiología multifactorial, por su elevada frecuencia y sus múltiples complicaciones constituyen un importante problema de salud. Son la principal causa de muerte por lesión en los AM debido a la susceptibilidad a los accidentes, atribuido a cambios fisiológicos o enfermedades degenerativas agudas o crónicas (4)

La interacción entre factores de riesgo (alteraciones del equilibrio y marcha, fármacos y enfermedades crónicas) y la exposición a situaciones u oportunidades de caer se deben tomar en cuenta simultáneamente, debido a que la caída en un adulto mayor no es un hecho impredecible o inevitable, debido al azar o al envejecimiento normal del individuo. En la mayoría de los casos se trata de una inadaptación entre la persona y su entorno de origen multifactorial; el riesgo de sufrir una caída aumenta linealmente con el número de factores de riesgo existentes (5).

CAUSAS Y CONSECUENCIAS QUE PRECIPITAN AL ADULTO MAYOR A PRESENTAR UNA CAÍDA

Algunos autores identificaron que las caídas en la población de AM, son causadas como muestra de lo que en apariencia parecería ser el comienzo de un proceso de claudicación de la fuerza vital de un sujeto, asociando el proceso de envejecimiento con varios cambios que predisponen a las caídas: los responsables de la estabilidad postural, las alteraciones visuales, auditivas y neurológicas propias de la edad (6). En relación al lugar de ocurrencia aproximadamente 80 % ocurren en el hogar y el resto fuera de él; suceden tanto en posición de pie como en situación de reposo (7). De un tercio a la mitad de las personas mayores de 65 años sufren una caída cada año (8).

Aproximadamente 30 % de los adultos mayores que se encuentran en casa hogar para ancianos sufren caída cada año; el número es mayor en las instituciones de salud. A pesar de que





menos de una caída de cada 10 causa una fractura, un quinto de los incidentes de caídas requiere atención médica (9). Es común que los AM que presentan caídas tengan en promedio de tres a cuatro enfermedades coexistentes, entre las más comunes se encuentran alteraciones cardiovasculares, metabólicas, musculo esqueléticas, así como discapacidad visual y motora predominantemente en el sexo femenino y de mayor edad (2,6). Las caídas repercuten en la estancia hospitalaria y elevan el costo económico por las complicaciones inherentes (10).

FACTORES DE RIESGO

Para este estudio se consideraron los factores de riesgo tanto intrínseco como extrínseco que pueden propiciar una caída y afectar la integridad física de las personas mayores de 60 años.

Los factores de riesgo son cualquier característica o circunstancia detectable de una persona o grupo de personas que se sabe asociada con un aumento en la probabilidad de padecer, desarrollar o estar especialmente expuesto a un proceso mórbido. Estos factores de riesgo (biológicos, ambientales, de comportamiento, socioculturales, económicos) pueden sumándose unos a otros, aumentar el efecto aislado de cada uno de ellos produciendo un fenómeno de interacción (11, 12).

El factor de riesgo intrínseco se consideró como una condición fisiológica relacionada con el individuo que puede predisponer a una caída, como son: caídas previas, número de enfermedades y medicamentos que actualmente consumen las personas así como el nivel cognitivo, equilibrio y cambios en la marcha.

El factor de riesgo extrínseco, se reconoció como la condición ambiental que puede incrementar la susceptibilidad de caer y producir daños a la salud del adulto mayor, como: características de los pisos, de las áreas de la vivienda, la iluminación, escaleras, áreas exteriores y precauciones personales.

OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El propósito de este estudio fue identificar los factores de riesgo de caídas a los cuales está expuesta la población adulto mayor derechohabiente de una institución de primer nivel de atención. Los objetivos fueron: 1. Identificar el perfil sociodemográfico y antecedentes de caídas de la población sujeto de estudio y 2.

Identificar los factores de riesgos intrínsecos y extrínsecos de caídas de la población por sexo y grupo étnico.

CARACTERÍSTICAS DEL ESTUDIO Y METODOLOGÍA

El presente estudio es de tipo descriptivo, a través del cual se describen los factores de riesgo de caídas de los AM (13). La población estuvo conformada por adultos mayores de 60 años adscritos a la Clínica de Medicina Familiar del ISSSTE de la ciudad de Hermosillo, Sonora, México. La muestra fue calculada en el paquete estadístico nQuery advisor v. 4.0, con un nivel de significancia de 0.05 y un límite de error de 0.06, quedando constituida por 190 AM, correspondiendo a 107 hombres y 83 mujeres.

Para recolectar la información, se acudió al servicio de consulta externa de la institución de salud para la selección de los usuarios con base al control de citas diarias. Se elaboró una cédula de datos sociodemográficos la cual permitió recabar información sobre: edad, sexo, escolaridad, problemas de salud, tratamiento médico actual, así como antecedentes de caídas, causas y lugar de ocurrencia. Se valoró el estado cognitivo con el examen mental de Pfeiffer. El equilibrio estático y dinámico fue evaluado con la Escala de Tinetti para equilibrio. Continuando con la valoración de la marcha empleando la Escala de Tinetti para marcha. Finalmente se utilizó una lista de Verificación de Seguridad Domiciliaria (14) la cual evaluó las características arquitectónicas y la presencia o ausencia de riesgos en el medio ambiente del adulto mayor. Al concluir la entrevista se proporcionó información sobre Prevención de Caídas en el Hogar de los Adultos Mayores.

Los resultados se procesaron en el paquete estadístico SPSS v. 13.0, se analizó la distribución de variables continuas mediante la prueba de Kolmogorov Smirnov. Se obtuvo el coeficiente de Alpha de Cronbach de los instrumentos de Tinetti para las subescalas de equilibrio y marcha y la escala equilibrio-marcha. Se utilizó estadística descriptiva a través de frecuencias y medidas de tendencia central. La estadística inferencial fue analizada con pruebas no paramétricas de U de Mann Whitney y la Prueba de Kruskal-Wallis.

RESULTADOS

La edad predominante de los adultos mayores estuvo en el rango de 65 a 74 años ($= 71.43 + DE = 7.08$), el 56.3 % era del

sexo masculino y 43.7 % femenino, el 88.4 % vivía con familia y 85.3 % habitaban en casa de una planta. El 55.8 % había presentado antecedentes de caídas previas al momento del estudio, con $\bar{x} = 1.14$ + (DE =1.54) de estos, 42.1 % sufrió de una a dos caídas y 7.9 % de cinco a más, un 32.1 % habían sufrido alguna caída en los últimos seis meses. La población padecía de una a dos enfermedades crónico-degenerativas (70.5 %) y el 75.2 % tomaban de uno a cuatro medicamentos ($\bar{x} = 2.60$ + DE = 1.77).

De la población que reportó haber sufrido caídas, el 41.6 % correspondió a factores extrínsecos predominando la presencia de obstáculos y superficies resbalosas en el medio ambiente. Del 14.2 % de los factores intrínsecos prevaleció la pérdida del equilibrio. En cuanto al lugar de ocurrencia de las caídas 26.3 % sucedieron en la casa, 16.8 % en la calle y 12.6 % en lugares públicos. De las caídas en casa predominó el área del baño (6.8 %) y patio (4.7 %). Las caídas registradas en la calle sucedieron en la banqueta (14.2 %). Las caídas en lugares públicos prevalecieron los comercios en 2.1 % y otras con 6.9 %.

Al evaluar el estado cognitivo se identificó que 91 % de los adultos mayores no presentaron alteración y solo 6.3 % tenía deterioro leve. En la evaluación del equilibrio 89.5 % mostró riesgo de pérdida del equilibrio y 44.2 % presento riesgo para la marcha. Con relación a la evaluación integrada de equilibrio -marcha se identificó que más del 50 % de la población presentó algún riesgo de caer y 20.5 % presentó cinco veces más riesgo. (Tabla1).

Variable	Indicador	f	%
Estado Cognitivo	Intacta	173	91.1
	Deterioro Leve	12	6.3
	Deterioro Moderado	4	2.1
	Deterioro Severo	1	0.5
Equilibrio	Normal	20	10.5
	Con riesgo	170	89.5
Marcha	Normal	106	55.8
	Con riesgo	84	44.2
Equilibrio-Marcha	Normal	53	27.9
	Riesgo	98	51.6
	5 veces más riesgo	39	20.5
Fuente: SPMSQ, Tinetti		n = 190	

Tabla 1. Evaluación del Estado Cognitivo, Equilibrio, Marcha y Equilibrio-Marcha

En la valoración del equilibrio, 66.3 % empleó los brazos para levantarse, 21.1 % requirió de más de un intento o ayuda para ponerse de pie, en posición de pie 68.9 % mantuvo una posición estable con una distancia mayor de 12 centímetros entre los talones, al ejercer un empujón ligero 45.8 % se tambaleó y 14.7 % tendió a caerse, 42.1% al mantenerse de pie con los ojos cerrados mostró inestabilidad, al realizar un giro de 360 grados con los ojos cerrados 44.2 % mostró pasos discontinuos y 33.2 % inestabilidad, al sentarse el 44.7 % usó los brazos para asegurarse y 7.4 % se mostró inseguro.

En la evaluación de la marcha, el 88.9 % no vaciló al iniciar la marcha, presentaron buena altura, longitud y simetría del paso con ambos pies, 13.7 % mostró discontinuidad al caminar, 23.6 % presentó desviación leve/moderada o marcada de la marcha, en

23.7 % se observó alguna alteración de la posición del tronco y 29.5 % separó los talones cuando caminó.

Con respecto a los factores de riesgo extrínseco en el interior del hogar el 24.7% contaba con pisos de material resbaloso, 37.4 % presentaban desnivel o irregularidades. En el baño no utilizaba tapetes antideslizantes en el área de regadera (84.2%), ni en el cuarto de baño (70.5 %), un 86.3 % no tenían instalada agarradera fija en el área de regadera. En relación con la iluminación 45.8 % no contaban con luces nocturnas que conducen al baño y 51.6 % con lámpara o apagador que pudieran alcanzar desde la cama.

En cuanto a los factores de riesgo extrínsecos en el área exterior, el 56.8 % tenían tapete en la entrada de la casa, en 30.5 % no estaban bien pavimentadas las calles y banquetas de su comunidad y 22.6 % contaban con obstáculos alrededor de su casa. En relación al calzado 28.4 % acostumbraba a caminar descalzo y con calcetines (25.3 %). Entre las precauciones personales el 65.3 % no tenían banco para alcanzar objetos en altos y 41.6 % tenían animales de compañía con los cuáles pueden tropezar. Con respecto a la población que habitaba en casa de dos plantas 12.1 % no contaban con antiderrapante en cada uno de los escalones.

Al comparar el sexo de los participantes con los factores de riesgo intrínsecos se identificó diferencia significativa con mediana más baja para el sexo masculino en relación a enfermedades (Mdn= 1.00, U= 3103.50, p= .000), tratamientos (Mdn= 2.00, U= 3167.50, p= .001) y caídas previas (Mdn= 0.00, U= 2717.00, p= .000). Además se identificó diferencia significativa en el sexo femenino en relación al equilibrio con mediana = 11.00 (U= 3617.00, p= .028). (Tabla 2).

Factores de riesgo intrínsecos	Sexo				U	Valor de p
	^a Femenino		^b Masculino			
	\bar{x}	Mdn	\bar{x}	Mdn		
Enfermedades	2.00	2.00	1.38	1.00	3103.50	.000
Tratamientos	3.07	3.00	2.23	2.00	3167.50	.001
Caídas previas	1.71	1.00	0.69	0.00	2717.00	.000
Equilibrio	10.61	11.00	11.50	13.00	3617.00	.028
Marcha	10.31	12.00	10.32	12.00	4368.00	.832
Equilibrio-marcha	20.96	22.00	21.82	24.00	3729.00	.058
Fuente: CDS, Tinetti					^a n = 83, ^b n = 107	

Tabla 2. Factores de Riesgo Intrínsecos en relación al Sexo de los participantes

Los factores de riesgo intrínsecos (enfermedades, tratamientos y caídas previas) en relación al grupo etáreo, no se encontró diferencia significativa, entre los grupos de edad con $p > .05$. En relación con enfermedades se encontró en el grupo de 75 a 79 años mediana más alta (Mdn= 2.00, H= 1.85, p= .763), en tratamientos la mediana más baja se identificó en el grupo de 75 a 79 años (Mdn= 2.00, H= .25, p= .992), y en caídas previas la mediana más baja fue para el grupo de 65 a 69 con mediana de 0.00 (H= 5.09, p= .277).

En cuanto a los factores de riesgo intrínsecos (equilibrio, marcha y equilibrio-marcha) en relación con el grupo etáreo, se identificó diferencia significativa entre los diferentes grupos de edad con $p = .000$. Obteniéndose medianas más bajas en el



equilibrio para los grupos de 75 a 79 y los mayores de 80 años con mediana = 10.00 ($H= 29.11$, $p=.000$) respectivamente. En marcha el grupo de 80 y más años mostró mediana más baja ($Mdn= 10.00$, $H= 18.04$, $p=.001$) y en relación con el equilibrio-marcha el grupo de 80 y más años mostró mediana más baja ($Mdn= 19.00$ ($H= 28.56$, $p=.000$). (Tabla 3).

Factor de Riesgo Intrínseco	Edad	<i>n</i>	\bar{x}	<i>Mdn</i>	<i>H</i>	Valor de <i>p</i>
Equilibrio	60-64	31	13.16	13.00	29.11	.000
	65-69	48	12.63	13.00		
	70-74	48	10.50	12.00		
	75-79	33	10.18	10.00		
	80 y más	30	8.60	10.00		
Marcha	60-64	31	11.29	12.00	18.04	.001
	65-69	48	11.27	12.00		
	70-74	48	10.25	12.00		
	75-79	33	9.94	12.00		
	80 y más	30	8.30	10.00		
Equilibrio-Marcha	60-64	31	24.35	25.00	28.56	.000
	65-69	48	24.02	24.50		
	70-74	48	20.75	23.00		
	75-79	33	20.12	22.00		
	80 y más	30	16.90	19.00		
Fuente: Tinetti						<i>n</i> = 190

Tabla 3. Factores de Riesgo Intrínsecos: Equilibrio, Marcha y Equilibrio-Marcha en relación al Grupo Etéreo

Al valorar los factores de riesgo extrínsecos en relación con el sexo se identificó que no mostraron diferencia significativa, la mediana más baja correspondió al sexo femenino ($Mdn= 67.18$, $H= .781$, $p= .377$). Con respecto a los factores extrínsecos en relación con el grupo etéreo, se observa que no existió diferencia significativa entre los grupos de edad, las medianas más bajas se observaron para los grupo de 60 a 64 y 80 y más años respectivamente ($Mdn = 67.18$, $H= 5.237$, $p= .264$). (Tabla 4)

DISCUSIÓN

La mayoría de la población AM estudiada vivía con familia y más de la mitad había presentado caídas en algún momento de su vida, de éstos casi la mitad habían sufrido de una a dos caídas en un período mayor a seis meses y una tercera parte en los últimos seis meses, esto coincide con autores (2) quienes señalan que en los países desarrollados las personas mayores de 65 años que viven en su hogar pueden caer una o más veces por año, incrementándose hasta la mitad en los AM de 80

años, identificando como factor de protección que el AM viva acompañado.

Más de la mitad de los AM de 60 años tenían antecedentes de caídas previas, el predominio de las mismas ocurrieron fuera del hogar atribuidas a obstáculos y superficies resbalosas; algunos autores mencionan que la mayoría de las caídas ocurren fuera del hogar ocasionadas por las mismas causas, sin embargo, este hallazgo no coincide con lo reportado por otros autores (7) quienes identificaron que la mayoría de las caídas ocurren en el hogar, tanto en posición de pie como en situación de reposo.

En relación al lugar específico donde ocurrieron las caídas dentro del hogar, los factores ambientales son la principal causa precipitante de caídas por accidente siendo los más representativos bañeras, escaleras y muebles que disminuyen las áreas de tránsito en los pasillos del hogar, mismos que se constituyen en factores de riesgos de caídas. Los AM padecían hasta cuatro enfermedades crónico degenerativas, predominando hipertensión arterial sistémica y diabetes mellitus y recibían en promedio 2.6 hasta un máximo de nueve medicamentos como tratamiento, esto es similar a lo reportado por algunos autores (2,6) donde es común la presencia de pluripatologías, medicación múltiple, edad mayor de 80 años, discapacidad para deambular y visual como factores asociados a caídas previas.

En relación al estado cognitivo, la gran mayoría de la población tenía un nivel cognitivo intacto, no se encontró relación con las caídas; estos resultados coinciden con autores que reportaron que las personas que cayeron tenían evaluación funcional y mental normal en dos terceras partes de la población, no encontrándose asociación con el riesgo de caer. En la evaluación equilibrio-marcha se identificó que la mitad de las personas mostraron riesgo y una quinta parte presentó cinco veces más riesgo de caer, los trastornos de marcha están relacionados con el riesgo de caer atribuidos a cambios fisiológicos de la edad.

Las personas que presentaron alguna alteración del equilibrio y/o marcha, mostraron mecanismos de adaptación para su situación como son el empleo de los brazos para levantarse y asegurarse al momento de sentarse, algunos requirieron de ayuda para ponerse de pie y mantuvieron una base de sustentación con distancia mayor a 12 centímetros al ponerse de

Variable	Edad	n	\bar{x}	Mdn	H	Valor de p
Factores de Riesgo Extrínsecos	60-64	31	66.83	67.18	5.237	.264
	65-69	48	68.39	68.75		
	70-74	48	71.02	70.31		
	75-79	33	69.27	68.75		
	80 y más	30	69.11	67.18		
Fuente: LVSD						n = 190

Tabla 4. Factores de Riesgo Extrínsecos en relación al Grupo Etéreo

pie. Para la marcha se identificaron el uso de ayudas para caminar y separar los talones cuando caminan. Esto coincide con otros autores (1, 8) que reportan que a los factores de riesgo se agregan el no flexionar las rodillas durante la marcha y no levantar el pie completamente del suelo.

En relación con los factores de riesgo extrínsecos se identificó que la mayoría de la población estaba expuesta a riesgos de caer, esto coincide con lo reportado por algunos autores (9,14) que encontraron asociación entre las condiciones de la vivienda con el riesgo de caer e identificaron que la mayoría de la población mostró algún tipo de riesgo de caer dentro y fuera del hogar, siendo los más detectados la presencia de pisos resbalosos, desniveles, obstáculos y el uso inadecuado de calzado.

CONCLUSIONES

La población estudiada estaba expuesta a riesgo como antecedentes de una a dos caídas previas en un período de seis meses, siendo los más susceptibles de presentar caídas los mayores de 75 años. Entre los factores intrínsecos se identificó que la pérdida del equilibrio fue la principal causa atribuida a las caídas. En razón de las enfermedades, consumo de medicamentos



y caídas previas se encontró diferencia significativa en relación con el sexo.

En la valoración del equilibrio se encontró que casi la totalidad de la población presentó alteración o riesgo de caer, en la marcha una minoría mostró riesgo, se identificaron mecanismos de adaptación para la misma, como fue el uso de aditamentos y aumento de la base de sustentación para deambular. En la valoración del equilibrio-marcha como predictor de caídas se encontró que la mayoría presentaba riesgo y un porcentaje importante presentaba cinco veces mayor riesgo de caer.

En relación con los factores de riesgo extrínsecos, las causas de caídas más frecuentes fueron atribuidas a la presencia de obstáculos y superficies resbaladizas dentro del entorno habitual de la población, sin embargo las caídas se presentan dentro y fuera del hogar.

No se encontró diferencia significativa en los factores de riesgo extrínsecos en relación con el sexo y el grupo etéreo. Al realizar la verificación de seguridad domiciliaria y medidas de seguridad personal se identificó que la mayoría de la población no cuenta con la cultura de prevención de caídas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Genua, M. I., Miró, B., Hernández R., Martínez, M., Miró, M. & Pardo, C. (2000). Geriatria: Farmacología Hospitalaria. 965-967.
2. Santillana, H. S., Alvarado, M. L., Medina, B. G., Gómez O. G. & Cortés, G. R. (2002). Caídas en el Adulto Mayor. Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social, 40(6), 489-493.
3. Instituto Nacional de Salud Pública. (2000). Encuesta Nacional de Salud. La Salud de los Adultos.
4. Organización Mundial de la Salud/Organización Panamericana de la Salud. (2004). Seguridad de los Pacientes, un Problema de Salud Pública Mundial. Centro de Noticias OPS/OMS Bolivia.
5. Varela, P. L. (2005). El Adulto Mayor con Caídas Recurrentes. XXVI Curso Internacional de Medicina Interna. Recuperado el 15 de Diciembre de 2005, <http://www.medicinainterna.com>.
6. Gac, E. H. (2000). Caídas en el Adulto Mayor. Programa de Geriatria y Gerontología. Pontificia Universidad Católica de Chile. Recuperado el 20 de Noviembre de 2005, de <http://escuela.med.puc.cl/publ/boletin/Geriatria/CaidasAdulto.html>
7. Pescador, V. A., Lizán, G. M., Salas, S. M., Romero, G. A. & Córcoles, J. P. (2002). Registro de Caídas en el Complejo Hospitalario del Albacete durante el Año 2000.
8. Esterson, S. (2005). Caídas en la Tercera Edad. Recuperado el 23 de Noviembre de 2005, de <http://www.enplenitud.com/nota.asp>
9. Gillespie, L. D., Gillespie, W. J., Robertson, M. C., Lamb, S. E., Cumming, R. G., Rowe, B. H. (2003). Intervenciones para la Prevención de Caídas en las Personas Ancianas. Biblioteca Cochrane Plus, 3. Recuperado el 4 de diciembre de 2005, de <http://www.update-software.com/abstractsES/AB000340-ES.htm>
10. Tapia, V. M., Salazar, C. M., Tapia, C. L. & Olivares, R. C. (2003). Prevención de Caídas. Indicador de Calidad del Cuidado Enfermero. Revista Mexicana de Enfermería Cardiológica, 2(11), 51-57.
11. Fernández, S. P., Vila, A. & Montero, C. (1997). Determinación de Factores de Riesgo. Atención Primaria en la Red. Recuperado el 18 de Junio de 2006, de http://www.fisterra.com/mbe/investiga/3f_de_riesgo/3f_de_riesgo.html.
12. Tawfik, A. M. (2002). Glossary of Health Care Quality Interpretations of Care. (1ª ed.). Universidad de Baylor, Texas. USA.
13. Polit, D. F. & Hungler, B. P. (1999). Investigación Científica en Ciencias de la Salud. (6ª ed.). México: McGraw-Hill Interamericana.
14. Rodríguez, P. R. (1999). Estímulos Contextuales, Respuesta Fisiológica y Caídas en el Adulto Mayor. Tesis de Maestría no publicada. Facultad de Enfermería, Universidad Autónoma de Nuevo León. México.

DINÁMICA CLÁSICA Y FRAGMENTACIÓN EN EL PROCESO DE FORMACIÓN DE PROTO-ESTRELLAS

GUILLERMO ARREAGA GARCÍA, SILVIO ORESTE TOPA

Las estrellas nacen en nubes de gas como resultado final del proceso de colapso gravitacional. En este proceso actúan varias fuerzas, a saber: la prominente fuerza atractiva de la gravedad debido al peso de la propia nube; la fuerza repulsiva de la presión del gas y la fuerza centrífuga originada por la rotación que se observa generalmente en las nubes moleculares. En este trabajo de divulgación nos interesa describir algunas de las principales características dinámicas de este proceso, haciendo énfasis en la ocurrencia de fragmentación de la nube progenitora. Para esto, nos apoyaremos en simulaciones numéricas del proceso de formación de proto-estrellas que hemos realizado recientemente.

DR. GUILLERMO ARREAGA GARCÍA
Departamento de Investigación en Física
Universidad de Sonora.
DR. SILVIO ORESTE TOPA

Partido de Tornquist - Pcia. de Buenos Aires, Argentina

INTRODUCCIÓN

El proceso de formación estelar ocurre en nubes de hidrógeno molecular que se localizan frecuentemente en los brazos de las galaxias espirales. En la Figura 1 se muestra una fotografía de la nebulosa NGC 1333, una nube progenitora típica de estrellas ubicada en la constelación de Perseus a 1000 años luz de distancia, una de las regiones más próximas de formación estelar. Otro ejemplo muy conocido es la nebulosa M42, o nebulosa de Orión. A unos 1270 años luz de la Tierra, es una de las nebulosas más brillantes del cielo nocturno, observable fácilmente a simple vista al sur del cinturón de Orión en la constelación del mismo nombre. Los astrónomos han concluido por observaciones que las estrellas recién nacidas están agrupadas muy frecuentemente en pares y en menor proporción en grupos de más de dos miembros de estrellas. En el seno de estas nubes gigantes puede haber entonces miles de estrellas jóvenes apareadas en pequeños grupos binarios.

Ahora bien, podemos considerar que el proceso de formación estelar viene ocurriendo desde que el Universo era muy joven y actualmente sigue teniendo lugar en diferentes partes del Cosmos, dando origen a millones de estrellas jóvenes. Sin embargo, existen ciertas características comunes en estos conjuntos de estrellas jóvenes, por ejemplo: el número de estrellas recién nacidas con una cierta masa parece que siempre es muy similar independientemente de la nube progenitora en la cual se realice el conteo. Esta similitud en la distribución de estrellas jóvenes podría ser una consecuencia de que el proceso de formación de estrellas es similar en todas las nubes que se encuentren en condiciones físicas similares en los brazos de cualquier galaxia. En otras palabras, deben existir principios físicos generales que rigen el complejo proceso de evolución que va desde la formación de la nube progenitora hasta el nacimiento de estrellas.

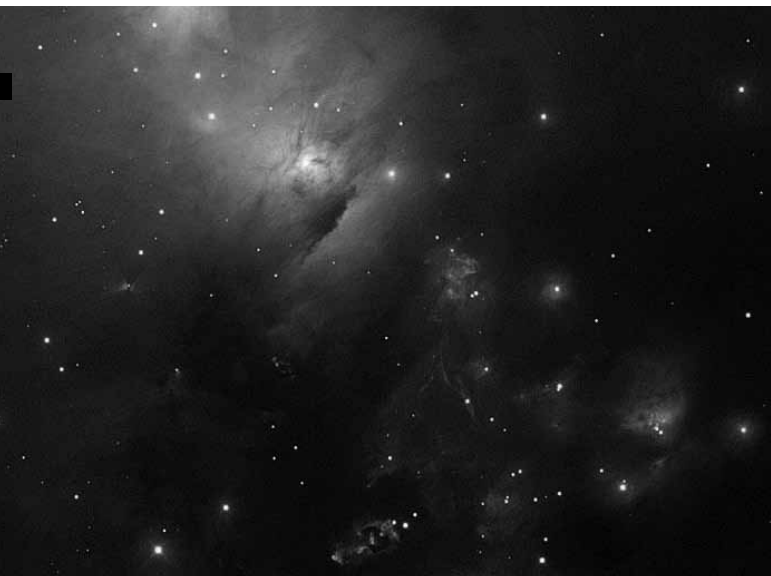


Figura 1. Nube Molecular en NGC1333 mostrando varias generaciones de estrellas.

Si tenemos en cuenta las escalas de tiempo involucradas en el proceso de evolución estelar – millones a miles de millones de años – la pregunta que naturalmente surge es ¿cómo podemos comprender el mismo si nuestra existencia es tan efímera en comparación?. Haciendo uso de una analogía, podemos imaginar a un científico que sólo tiene un mes para estudiar una abundante población de leones en el África. Es comprensible que en ese período de tiempo le sea imposible poder observar la evolución de un individuo en particular desde su gestación hasta su muerte por vejez. La solución al problema viene del hecho de que debido a que la población es abundante, tendrá ejemplos de los distintos estadios de estos animales (leonas preñadas, cachorros, animales adultos y en el final de su vida). De ello se desprende que el científico pueda extrapolar sus datos y reconstruir la vida de esta población de animales sin la necesidad de observar la historia de un solo animal. Un astrónomo al observar el firmamento se encuentra en la misma situación, pudiendo recrear la evolución de los distintos tipos de estrellas y elaborar hipótesis sobre cómo las leyes físicas operan sobre la misma. De allí la importancia de las simulaciones numéricas, ya que nos permiten comparar y validar o refutar estas hipótesis en base a los resultados de las mismas y los datos recopilados observacionalmente.

El trabajo de investigación que hemos desarrollado en años recientes nos ha permitido entender con mayor detalle el proceso de formación de sistemas binarios de proto-estrellas. Sin embargo, este es un fenómeno físico complejo, tal que un estudio abordado de manera tradicional implicaría la imposibilidad de visualizar los detalles del proceso. Es aquí en donde la potencia de la informática y las simulaciones numéricas se vuelven una herramienta muy útil, por no decir indispensable, a la hora de estudiar el proceso de formación en detalle. En las secciones siguientes intentaremos mostrar al lector algunos de los aspectos físicos más importantes del colapso gravitacional de nubes progenitoras. Nos interesa destacar la inter-relación de fuerzas como una manera de ilustrar la aplicación de las leyes de la física clásica y la ocurrencia de la fragmentación de nubes como el mecanismo principal para dar origen a grupos binarios de proto-estrellas.

LA ETAPA INICIAL DEL COLAPSO GRAVITACIONAL

Como se puede ver en la Figura 1, hay mucha actividad en las nubes progenitoras de origen tanto interna como externa. Por ejemplo, las nubes se calientan porque reciben radiación cósmica (proveniente de regiones distantes del Universo); fuertes vientos estelares (provenientes posiblemente de explosiones de estrellas supernovas localizadas en la misma nube). También es común que ocurran colisiones entre nubes como consecuencia de fuerzas de marea provocadas por la presencia de galaxias vecinas o incluso por colisiones directas entre galaxias enteras, provocando la redistribución del gas en la nube.

Debido a tales eventos, en algunas regiones de la nube el gas se acumula en torno a pequeñas perturbaciones de masa

que alcanzan de manera fortuita una densidad mayor que su medio ambiente circundante. La fuerza de gravedad intenta siempre ensamblar más materia sobre estas primeras acumulaciones fortuitas de gas debido a su naturaleza de atracción entre toda la materia inter-actuante. Sin embargo, la presión del gas se opone permanentemente a ser comprimido por la fuerza de gravedad. Ahora bien, se ha observado que las nubes progenitoras son en general frías: una temperatura típica sería de 10 grados kelvin, es decir, unos 263 grados Celsius bajo cero. Mientras que su masa puede llegar a ser tan grande como cientos de veces la masa de nuestro Sol. Así pues, no es sorprendente que la fuerza de gravedad tenga muchas posibilidades de ganarle a la fuerza de presión en esta primera etapa de confrontación entre fuerzas de tal forma que en varias regiones separadas de la nube se inicia el proceso de acumulación de gas, ver Figura 2.

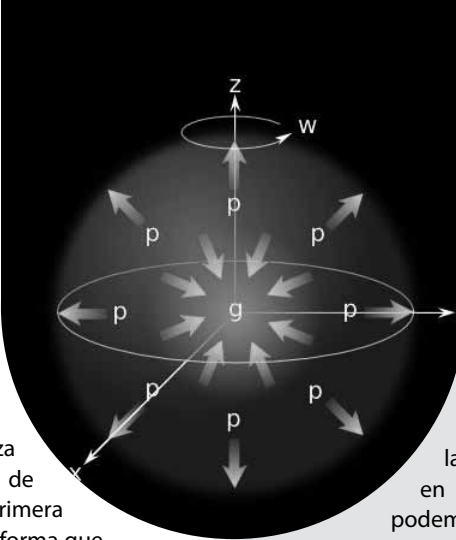
La acumulación inicial de gas ocurre de tal manera que una nube grande se ve conformada por varias subregiones de gas más o menos bien definidas, de menor tamaño pero de mayor densidad promedio que la nube mayor. Cada una de estas subnubes continúa tranquilamente con el proceso de acumulación de gas por gravedad durante miles de años; aunque existe la posibilidad que eventos ajenos perturben el proceso de acumulación. A esta clase de sub-nube se le llama nube pre-estelar porque ya es una fuerte candidata a iniciar el proceso de colapso gravitacional.

El nacimiento de una nueva estrella tiene lugar cuando el colapso gravitacional de la nube pre-estelar es tan intenso que la temperatura supera el valor crítico necesario para que tengan lugar los procesos de fusión nuclear propios de una estrella. No obstante, antes de llegar a esta etapa final del proceso de formación estelar, en el transcurso del colapso de la nube pre-estelar, ocurren interesantes fenómenos mecánico-clásicos, que se pueden vislumbrar al aplicar las leyes de la física a un modelo de nube pre-estelar simplificado, como hacemos a continuación.

LOS MODELOS DE NUBE

Las observaciones de los astrónomos indican que las nubes pre-estelares tienen núcleos más o menos bien definidos que se encuentran rodeados por un halo envolvente de gas. El núcleo de la nube contiene el gas más denso; mientras que el que se encuentra en las regiones intermedias y más alejadas del centro de la nube son cada vez menos densas. A estas nubes se les conoce como centralmente condensadas. Aunque este no es el único

Figura 2. Las fuerzas principales que actúan en un modelo de nube.



radialmente uniforme o centralmente condensada.

Consideremos una nube pre-estelar de gas con forma esférica que rota en torno a un eje, con una velocidad angular constante, tal como se ilustra en las figuras 2 y 3. Como habíamos indicado, la fuerza de gravedad jala toda la materia hacia el centro de la nube mientras la fuerza de presión empuja el gas hacia afuera. La rotación de la nube provoca la aparición de una fuerza centrípeta dirigida hacia el centro en cualquier plano de latitud (todo plano en la esfera paralelo al plano ecuatorial). De esta forma, todo elemento de gas sentirá una aceleración total hacia el interior de la nube, que está formada por dos contribuciones: una parte debida a la aceleración centrípeta dirigida hacia el centro del plano y otra parte debida a la aceleración gravitacional dirigida hacia el centro de la nube. Estas aceleraciones tienen direcciones co-lineales sólo en el plano ecuatorial mientras que en los polos son perpendiculares. Por esta razón, la aceleración total es mayor en el círculo ecuatorial que en las regiones cercanas a los círculos polares.

Recordemos que el momento angular es una medida de la cantidad de rotación de un cuerpo; además es una cantidad que se conserva durante toda la evolución de la nube ya que no hay torcas externas actuando sobre la nube. Así, como consecuencia de la rotación y por conservación de momento angular, la nube empieza a aplanarse de los polos hacia el ecuador, de tal manera que se forma un disco aplanado en el ecuador que gira más rápido que el resto del gas que todavía está en la nube esférica; este disco se le conoce como disco de acreción, porque el gas continúa cayendo sobre él por efecto de la fuerza de gravedad.

La anchura del disco de acreción queda determinada por el equilibrio mecánico

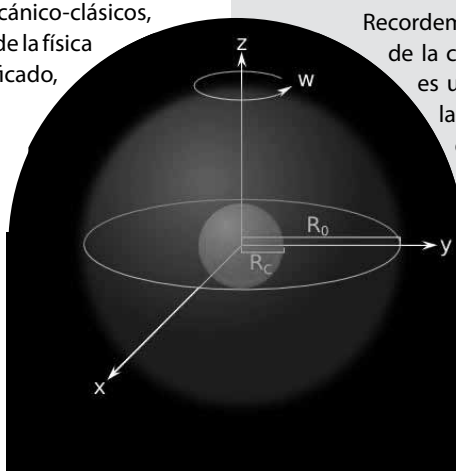


Figura 3. El núcleo y el gas envolvente en un modelo de nube centralmente condensada.

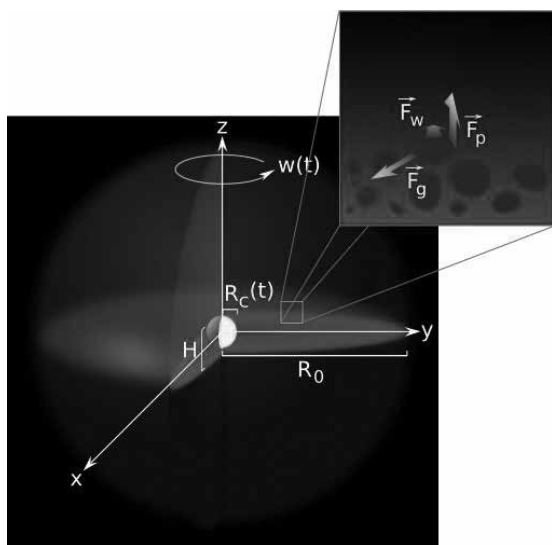


Figura 4. Anchura del disco de acreción y diagrama de cuerpo libre de un elemento de fluido.

entre las componentes verticales de las fuerzas gravitacional y de presión del gas, tal como mostramos en el recuadro de la figura 4, en el cual se ve un diagrama de cuerpo libre de un elemento de gas. En el equilibrio hidrodinámico, la proyección de la fuerza de gravedad en la dirección vertical, debe cancelar a la fuerza de presión que el gas ejerce como oposición al aplanamiento de la nube.

LOS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS

En nuestras simulaciones numéricas del colapso de nubes pre-estelares, hay muchas decisiones que tomar para establecer el estado físico inicial del modelo de nube, a saber: hay que fijar la velocidad de rotación y la temperatura; el radio y masa iniciales; la densidad de las nubes pueden ser diferentes y además, en el caso de nubes centralmente condensadas, la extensión del núcleo comparado con el halo de gas también puede variar, esto es, la razón R_0 / R_C de las figuras 3 y 4. Estas elecciones nos permiten investigar algún efecto en particular sobre el resultado final del colapso.

Para mostrar los resultados de algunas de las simulaciones usamos mosaicos formados por varios paneles, como se ilustra en las figuras 5 y 6. Cada panel en el mosaico corresponde a un tiempo de evolución del modelo, tal que el tiempo aumenta de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo. Cada pequeña imagen muestra -en una misma escala de colores para cada mosaico- la distribución de densidad de una rebanada de nube paralela al plano ecuatorial, tal como se la vería desde arriba. Por ejemplo, de acuerdo con la barra de escala de densidad (que aparece en la parte inferior de cada mosaico) el color amarillo indica regiones de la nube con densidades altas; los colores rojo y verde indican regiones con densidades intermedias y por último, el color azul indica regiones de baja densidad en la nube. Las escalas de longitud que aparecen es los ejes de cada panel están normalizadas con el radio inicial de la nube y la escala de densidad está normalizada con la densidad inicial de la nube. Se debe notar entonces, por las escalas en los ejes X (horizontal) e Y (el vertical), que en la figura 5 vemos el gas más denso que está contenido hasta el 10% del radio inicial de la nube, mientras que en la figura 6 vemos que el gas más denso se

concentra en la región del disco de acreción cuya extensión es de aproximadamente el 4 % del radio inicial.

El mosaico de la figura 5 corresponde a un modelo de nube pre-estelar con densidad uniforme mientras que el mosaico de la figura 6 muestra los resultados del colapso para una nube centralmente condensada. La primera y más importante diferencia entre estos mosaicos es que en la figura 5 la nube colapsa formando una sola concentración de materia en el centro de la nube, mientras que en la figura 6 se ve que la nube se fragmentó, de tal forma que aparecen varias concentraciones de materia resultantes que se encuentran orbitando unas con respecto a las otras. En ambos modelos se ve la formación de brazos espirales alrededor de las concentraciones de materia que aparecen también como una consecuencia de la rotación inicial de la nube pre-estelar. ¿Cómo se explica esta diferencia en los resultados?

Hemos implementado deliberadamente una perturbación de masa simétrica con respecto al origen de las coordenadas del plano ecuatorial de la nube, con el propósito de favorecer la formación de sistemas binarios como resultado. De ahí que los primeros cúmulos de gas que logran formarse son antípodas el uno del otro, de tal manera que una línea imaginaria que los une pasará a través del origen de coordenadas de la nube esférica original.

Cada uno de los cúmulos de gas recién formados por el fuerte colapso gravitacional de la nube pre-estelar (mostrados en amarillo en las figuras 5 y 6) ejercen por lo tanto un par gravitacional de atracción el uno sobre el otro. Entonces la velocidad de los elementos de gas empieza a alinearse con el eje imaginario de simetría que une los cúmulos, con el efecto neto que este gas del cúmulo pierde momento angular. Entonces sabemos que el gas que se acumula sobre el disco de acreción tiene poco momento angular; mientras que el gas que se acumula en los brazos espirales tiene mayor momento angular. Así es como los cúmulos principales de la simulación pierden su momento angular, de tal forma que la fuerza de gravedad que se ejercen entre ellos, las hace acercarse cada vez más hasta que finalmente se fusionan, como se puede ver en los primeros paneles de la figura 5.

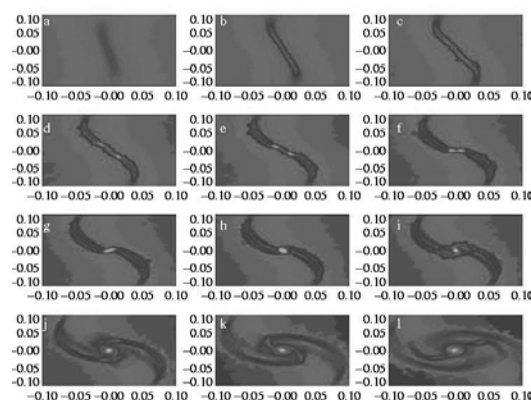


Figura 5. Mosaico de una simulación con una sola proto-estrella central como resultado.

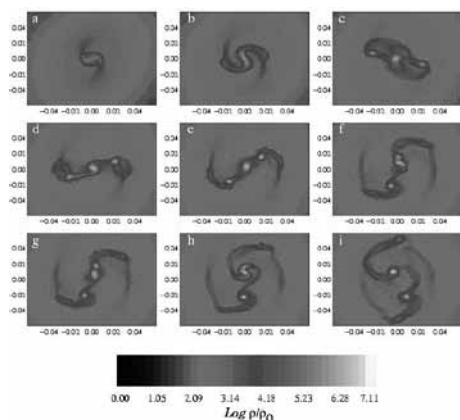


Figura 6. Mosaico de una simulación con varias proto-estrellas como resultado de la ocurrencia de fragmentación.

Ahora bien, la causa por la que no se produce fusión de cúmulos en la simulación de la figura 6, es tal vez la existencia de pequeñas variaciones en las posiciones y velocidades de las partículas que forman el gas, que tienen su origen en la aleatoriedad de la distribución de partículas que representan a la nube pre-estelar inicial.

¿Qué determina que ocurra o no fragmentación de la nube pre-estelar durante su colapso?

LA FRAGMENTACIÓN.

Para que una teoría de formación estelar tenga posibilidad de ser exitosa, debe explicar las observaciones astronómicas que muestran la presencia de miles de grupos binarios y múltiples de estrellas formadas en el seno de una sola nube progenitora. Se necesita de algún mecanismo físico que provoque la ocurrencia de la fragmentación de la nube pre-estelar, algo como se ilustra esquemáticamente en la figura 7.

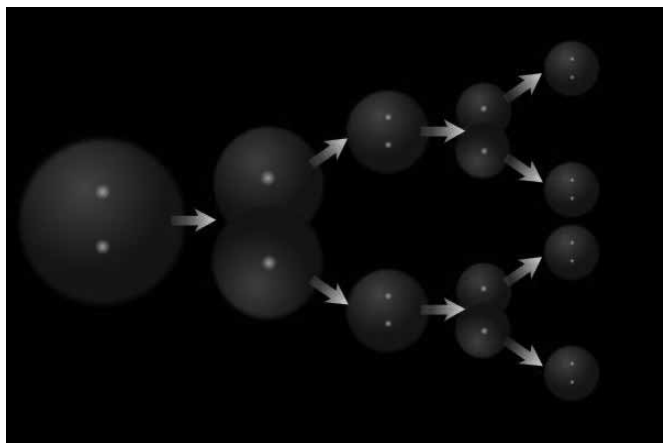


Figura 7. Diagrama esquemático que representa el proceso de fragmentación teórico requerido por las observaciones astronómicas.

Fue Fred Hoyle, astrofísico inglés autor de la Teoría del Estado Estacionario, el primer científico que propuso una explicación para la fragmentación durante el colapso gravitacional de la nube [2]. Hoyle argumenta que en la medida en que la nube colapsa, los grumos de materia (necesarios para iniciar

nuevas aglomeraciones de materia que pueden vencer la presión térmica y promuevan a su vez nuevamente el colapso gravitacional) pueden ser cada vez menores en la medida en que la temperatura de la nube no aumente por efecto del propio colapso. Sin embargo, sabemos que en la medida en que la nube colapsa, su tamaño se reduce; y que por esta reducción del radio, la energía gravitacional se convierte en calor.

¿Cómo se puede mantener la nube con una temperatura aproximadamente constante durante el colapso? Cuando el colapso no es todavía muy intenso, el gas se puede liberar de este exceso de energía cinética mediante emisión de radiación de las moléculas excitadas de hidrógeno. La radiación emitida debe ser capaz de difundirse hasta la superficie exterior de la nube y escapar finalmente para que este mecanismo de enfriamiento sea efectivo y permita la continuación del colapso isotérmico, el cual podría tener como consecuencia la tan deseada fragmentación. No obstante, en la medida en la que la densidad de la nube aumenta por efecto del colapso, la difusión de la radiación a través del medio molecular se hace cada vez más difícil. Entonces, como era de esperarse, el aumento de la opacidad de la nube hace que la temperatura del gas empiece a aumentar. En otras palabras, el aumento de temperatura hace que el gas aumente su resistencia al colapso dotándolo de mayor presión térmica. Llega un momento en que incluso el colapso se hace más lento (o se detiene por completo) y la fragmentación es mucho menos probable que ocurra, ya que no habrá varias regiones separadas en la nube en las que puedan crecer perturbaciones de masa simultáneamente.

En el trascurso de nuestras investigaciones, hemos observado que no sólo son los efectos termodinámicos de la nube los que determinan la ocurrencia de fragmentación. También hay elementos de origen puramente dinámicos que tienen influencia sobre la fragmentación.

De hecho, en las referencias 4, 5 y 6 hemos reportado varias maneras en que la fragmentación de las nubes pre-estelares puede ocurrir. Una manera es que la barra central se fragmente; otra sería que los brazos espirales se rompan y se separen del cúmulo central debido a que sus velocidades de rotación son diferentes; también pueden ocurrir ambas posibilidades en un mismo modelo, como se ilustra en la Figura 8. En esta figura se muestra que se produce la fragmentación de la barra central dando lugar a la formación de dos cúmulos proto-estelares interiores. Cabe señalar que los dos fragmentos exteriores resultantes del rompimiento de los brazos espirales están ya presentes en el momento en que la fragmentación de la barra central se produce. En este momento, el resultado de la simulación son cuatro fragmentos proto-estelares. Poco después, la ocurrencia de fusión entre dos fragmentos hace que sólo quedan dos fragmentos que entran finalmente en órbita uno con respecto al otro hasta alcanzar el equilibrio hidrodinámico, como se ilustra en la Figura 9.

En el artículo de investigación de la referencia 3, encontramos que a medida que la región envolvente del núcleo de la nube aumenta en extensión (esto es, la razón R^3/R_c^3 aumenta), la

Figura 8. Acercamiento a la región central de un modelo con múltiple fragmentación.

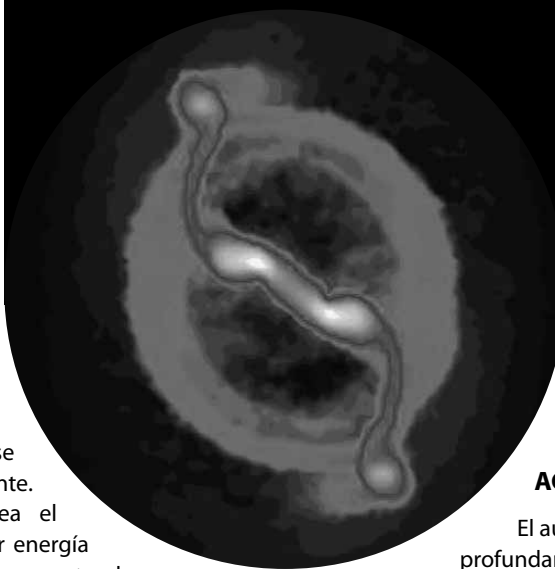
posibilidad de un modelo para producir fragmentos proto-estelares disminuye. Para explicar por qué ocurre esto, conviene enfatizar que todas las nubes con diferentes razones R^0 / R_c fueron dotadas inicialmente de la misma energía rotacional. Pero en el caso de las nubes centralmente condensadas, esta energía rotacional debe compartirse entre el núcleo y el gas envolvente. Entonces, mientras más grande sea el tamaño de la capa envolvente mayor energía debe tomar de la nube para mantenerse rotando con la misma velocidad angular que el núcleo; mientras que al núcleo le queda menos energía rotacional disponible para presentar oposición al colapso gravitacional; entonces, mientras mayor es el envolvente se induce un colapso más fuerte en la región central que provoca la destrucción de cualquier estructura que se haya formado durante las fases iniciales del colapso. Así, dotar al núcleo de suficiente energía de rotación es crucial para que ocurra la fragmentación.

CONCLUSIONES.

En el curso del colapso, la densidad de la nube pre-estelar aumenta en un rango que va desde 10^{-18} gr/cm³ hasta 10^{-8} gr/cm³, en la cual ya podemos identificar a los cúmulos de gas más densas de la simulación como proto-estrellas. Se sabe que muchas de las características dinámicas de una proto-estrella serán heredadas por la estrella real que se formaría de seguir el proceso de colapso, hasta densidades del orden de 10^{-1} gr/cm³.

Nosotros hemos logrado seguir la evolución del colapso hasta estas densidades intermedias. En este artículo de divulgación hemos presentado brevemente algunos aspectos importantes del colapso de nubes pre-estelares. Una de nuestras conclusiones es que el resultado final del colapso de nubes, y en particular la ocurrencia de la fragmentación, depende fuertemente de aspectos físicos tanto termodinámicos como dinámicos.

Finalmente, deseamos compartir con el lector nuestra convicción de que el paradigma tradicional de la investigación en física (teoría y experimento) se ha visto enriquecido con el desarrollo de la computación. Hoy día los investigadores estamos en posición de usar la enorme capacidad de cálculo de los computadores actuales para simular procesos físicos muy complejos como el de formación estelar. Pensemos que los resultados de una simulación que se conllevan con las observaciones astronómicas, es un claro indicativo de que el modelo elegido se



encuentra en el buen camino, pero aun cuando éstos se desvían claramente de los datos observacionales siguen siendo útiles poniendo en evidencia que el modelo es erróneo o por lo menos incompleto, pudiendo haber variables importantes que aún no han sido tenidas en cuenta.

AGRADECIMIENTOS.

El autor Guillermo Arreaga García, reconoce profundamente al director de la DCEN, M. en C. Miguel Ángel Moreno Núñez por su apoyo y por la adquisición del programa PV-WAVE, con el cual se han realizado las figs. 5, 6, 8 y 9 de este artículo.

BIBLIOGRAFÍA.

- 1.- E. A. Bergin y M. Tafalla, "The dark clouds: the initial conditions for star formation," Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Vol. 45, (2007), pags. 339-396
- 2.- F. Hoyle, "On the fragmentation of gas clouds into galaxies and stars," The Astrophysical Journal, 118, (1953).
- 3.- G. Arreaga y J. Klapp, "The gravitational collapse of Plummer clouds," Astronomy and Astrophysics, Vol. 509, (2010), pag. A96.
- 4.- G. Arreaga y J. Klapp, "Gravitational Collapse and Fragmentation of Molecular Cloud Cores with GadGet2," The Astrophysical Journal, 666, (2007), pag. 290-308.
- 5.- G. Arreaga y J. Saucedo, "Hydrodynamical Simulations of the Non-Ideal Gravitational Collapse of a Molecular Gas Cloud," Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica, Vol. 44, Num. 2, (2008), 259-284.
- 6.- G. Arreaga, "Física Computacional del Colapso Gravitacional," Revista de Física de la Universidad de Sonora. Junio del 2005.

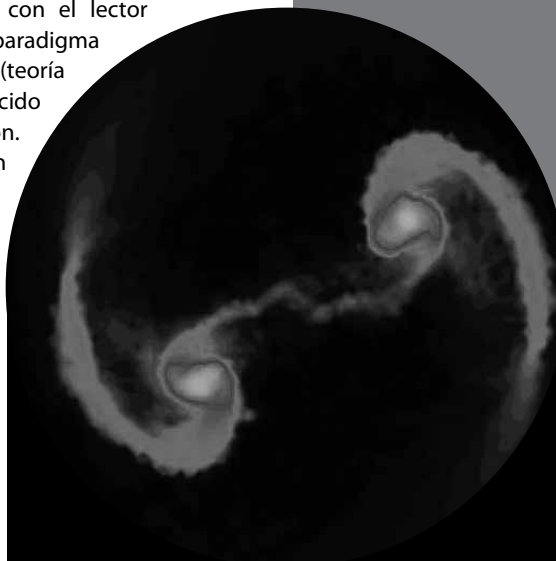
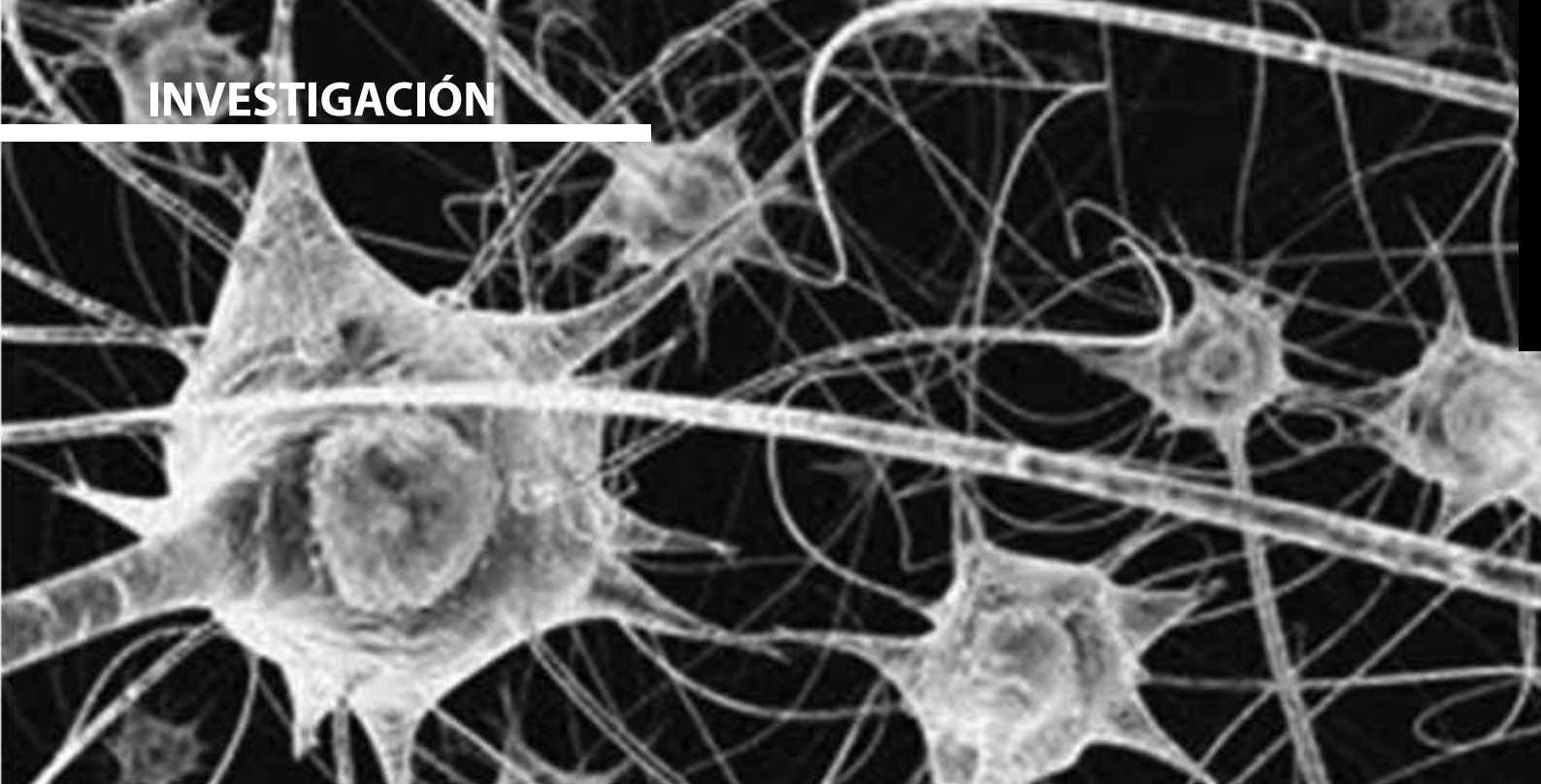


Figura 9. Acercamiento a la región central de un modelo con múltiple fragmentación.



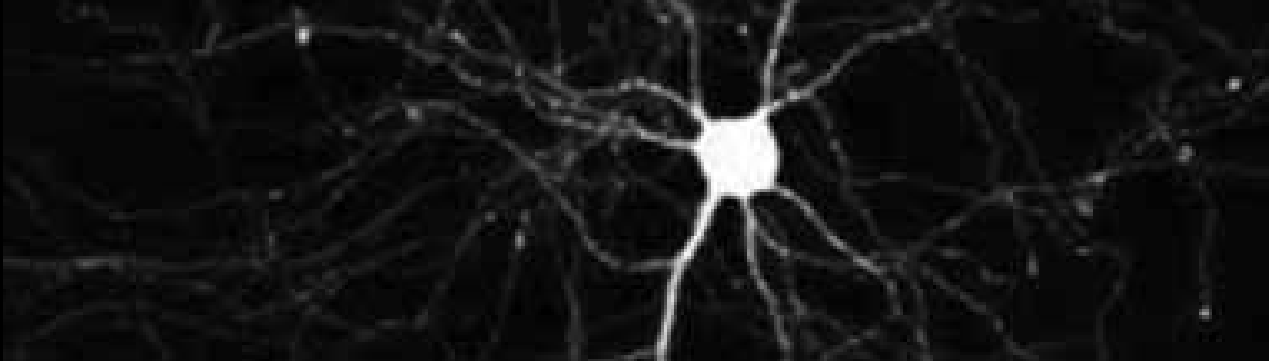
IDENTIFICACIÓN DE IMÁGENES Y VOCES MEDIANTE REDES DE HOPFIELD

UNA APLICACIÓN DE LAS REDES NEURONALES RECURRENTE

ARNULFO CASTELLANOS MORENO, FABIOLA SUSETH LÓPEZ AGUIRRE

En la Universidad de Sonora podría desarrollarse un sistema de reconocimiento de voces utilizando una red neuronal como la que será explicada al final de este artículo. Lo que se requiere es el sistema electrónico para reconocer las frecuencias más importantes de cada voz, medir la intensidad del armónico correspondiente y guardarla en un arreglo numérico del tipo de los vectores que se aprenden en álgebra lineal. A falta de un dispositivo similar, ejemplificamos aquí con el reconocimiento de letras, sin embargo, el procedimiento sería fundamentalmente el mismo.

DR. ARNULFO CASTELLANOS MORENO
Correo: acastell@correo.fisica.uson.mx
M. EN C. FABIOLA SUSETH LÓPEZ AGUIRRE
Correo: fabiolasuseth@gmail.com
Departamento de Física de la Universidad de Sonora



¿QUÉ SON LAS REDES NEURONALES RECURRENTES?

Las redes neuronales recurrentes son sistemas ideados como abstracciones de las estructuras neurobiológicas (cerebros) encontradas en la naturaleza y tienen la característica de ser sistemas desordenados capaces de guardar información. La forma en que desarrollan su trabajo es esencialmente distinta de la utilizada por las computadoras convencionales. Los procesadores microscópicos del cerebro (neuronas) operan en paralelo y presentan cualitativamente más ruido que los elementos que forman las computadoras. No ejecutan un programa fijo con base en un conjunto previamente especificado de datos, sino que comunican señales a través de retransmisores que llamamos sinapsis, que llegan a centros de conjunción llamados cuerpos de las neuronas y desde los cuales surgen señales eléctricas a través de canales conocidos con el nombre de axones.

La importancia de cada sinapsis en el proceso de retransmisión se actualiza continuamente y lo mismo ocurre con algunas propiedades intrínsecas de las neuronas, proporcionando un sistema de autoprogramación y adaptación que sustituye a la programación externa de los sistemas de cómputo comunes. Existe así una dinámica de las sinapsis y de las neuronas en el cual los programas y los datos cambian todo el tiempo.

Los cerebros no tienen una arquitectura o mapa de conexiones específico, por ejemplo, presentan estructuras relativamente ordenadas en centros receptores de información, pero en las regiones procesadoras de alto nivel como el neocórtex, son estructuras amorfas, prácticamente aleatorias.

Operando en paralelo, los cerebros dedican grandes cantidades de neuronas a una actividad determinada, lo cual da por resultado muchas actividades posibles, diferentes y complejas. Pueden adaptarse a circunstancias cambiantes, reconocer objetos deformados, borrosos, o parcialmente visibles. En síntesis, las redes neuronales son esencialmente diferentes de los sistemas de cómputo de la vida cotidiana.

Los distintos modelos de redes neuronales han planteado importantes e interesantes retos a los físicos teóricos, pues exhiben conductas muy ricas y nada triviales. Se trata de sistemas sumamente complejos de analizar por el gran número de elementos interactuantes, por el carácter no lineal de los elementos individuales que operan entre ellos,

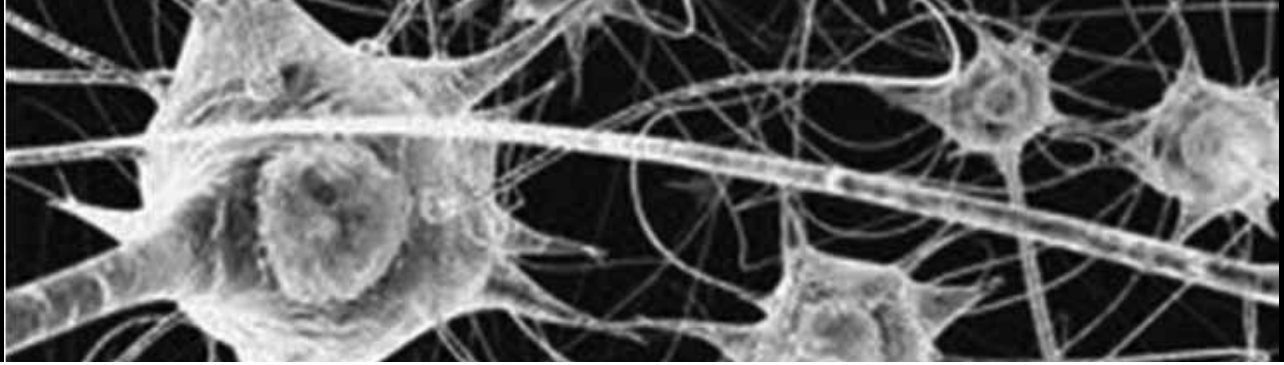
porque las interacciones no necesariamente son idénticas ni simétricas y porque la magnitud de las interacciones, así como los umbrales internos de cada neurona, pueden cambiar en el tiempo.

En los intentos por sistematizar la comprensión del cerebro pueden distinguirse dos caminos: i) el primero es el seguido por los neurofisiólogos, quienes generalmente confrontan una abundancia de datos tan vasta que dificulta el examen sistemático dentro de un marco de trabajo experimental. En este enfoque, los datos están perturbados por una cantidad muy grande de influencias que no pueden ser eliminadas fácilmente. ii) El segundo es el que han abierto los constructores de modelos sobre la base de un conjunto también grande de suposiciones acerca del sistema que se busca explicar, con la esperanza de que el enfoque ayude al surgimiento de nuevas hipótesis, susceptibles de ser verificadas con la diversidad de datos disponibles.

Dentro del segundo de los caminos hay dos opciones para los creadores de modelos: 1º) la que consiste en tratar de modelar al sistema real tanto como sea posible, pero con el dilema de que se plantean tantos parámetros que en realidad no se alcanza un conocimiento profundo; 2º) la opción de descartar, a priori, todos aquellos parámetros que a primera vista parecen no ser esenciales, a fin de simplificar el análisis matemático.

Los primeros buscan tanta fidelidad al sistema real que terminan siendo una copia de mala calidad en la que la comprensión del fenómeno se desvanece. Los segundos no constituyen representaciones realistas del cerebro, sino que su inspiración neuronal puede contribuir a comprender algunas de las propiedades que los caracterizan en el procesamiento de información. Entre otras, de aquí surgen las redes neuronales recurrentes.

Tomando como opción a la segunda de las mencionadas arriba, se ha definido lo que se llama una neurona formal [1], y sobre la base de ésta, a la red neuronal en su forma más general. El primer paso consiste en definir como sigue los estados de una neurona: a) el estado de lanzar una señal, y b) el estado de inactividad. Al primero se le asigna el número +1 y al segundo el -1. El segundo paso es establecer la conexión entre las neuronas mediante una matriz $\{J_{ij}\}$ en la que se especifica cuánto vale la conexión de la i -ésima con la j -ésima neurona. El tercer paso es



establecer una relación funcional en la que la j -ésima neurona recibe la información de todas las demás y en la que dependiendo de su umbral, produce, o no produce, una señal de intensidad F_i . En términos matemáticos la forma es

$$F_i \left(\sum_{j=1}^k J_{ij} s_j \right)$$

Para que la red neuronal pueda operar, es conveniente que las funciones F_i sean estrictamente crecientes y acotadas, del género de las llamadas funciones sigmoideas, como es el caso de la tangente hiperbólica y de la función signo que se presentará más adelante. Aquí es donde se introduce la no linealidad mencionada anteriormente y también el umbral de cada neurona, que es el límite de recepciones que puede soportar antes de mandar una señal.

Dependiendo del tipo de red, los pesos son variables que serán modificadas durante su evolución, o por el contrario, serán magnitudes fijas, como en el modelo de Hopfield que se discute en la siguiente sección.

Las neuronas tienen entradas y salidas, tal que estas últimas son calculadas con base en las primeras. Así surge el concepto de regla de aprendizaje, que consiste en la sistematización de la asociación entre una pregunta y una respuesta. En general, la pregunta r es un vector de mayor dimensión que la respuesta R . Un ejemplo típico es el reconocimiento de voces o sonidos, en los cuáles el vector de entrada r es un espectro de frecuencias, que debe ser transformado en una lista de palabras R .

UN EJEMPLO DE RED RECURRENTE ES LA DE HOPFIELD.

Un ejemplo simple de cómo se hace esto es la siguiente red de Hopfield simplificada [2]:

Consideremos una red de n neuronas cuyo estado está dado por un vector $r=(x_1, x_2, \dots, x_n)$, que nos indica si la i -ésima neurona está enviando señal con un $+1$, o con un -1 si está apagada. La operación de la red la podemos imaginar como si fueran las luces de un árbol navideño en los que cada foquito se prende y se apaga. Si en determinado momento tomamos una fotografía con una cámara de alta resolución y alta velocidad, lo que habremos logrado es captar uno de esos vectores r . Además se necesita el peso

de la conexión w_{ij} de la neurona i con la neurona j . También se necesitan las memorias a guardar, que podrían ser, por ejemplo, el catálogo de las frecuencias de las voces con las cuales será comparada la voz que se desea identificar. Este catálogo es un conjunto de p memorias que denotaremos como: $\{\phi_\mu\}$

Los pesos de la conexión estarán dados por la siguiente matriz

$$w_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{n} \sum_{\mu=1}^p \phi_i^\mu \phi_j^\mu & \text{si } i \neq j \\ 0 & \text{si } i = j \end{cases}$$

que puede ser organizada en un arreglo rectangular en la forma siguiente:

$$W = \begin{pmatrix} 0 & w_{12} & w_{13} & \dots & w_{1n} \\ w_{21} & 0 & w_{23} & \dots & w_{2n} \\ w_{31} & w_{32} & 0 & \dots & w_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ w_{n1} & w_{n2} & w_{n3} & \dots & 0 \end{pmatrix}$$

La capacidad de las neuronas para soportar la recepción de señales, sin transmitir ellas, se introduce mediante los umbrales de las neuronas organizados en el vector que sigue: $\Theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$

La decisión de emitir, o no emitir, se especifica con la regla de actualización del vector de estados de la red neuronal. Esta es

$$r(k+1) = \text{sign} [w_{ir}(k) - \theta_i]$$

Para saber cuándo el estado alcanzado por la red puede ser considerado como satisfactorio, se especifica un régimen de tolerancia tal que, una vez cumplida la siguiente desigualdad

$$|x_i(k+1) - x_i(k)| < \varepsilon$$

la red deja de operar.

Enseguida se imprime el estado final: r_{final}

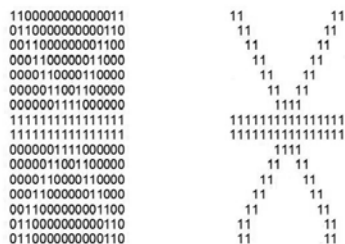


Figura 1: una letra formada sirve como punto de partida

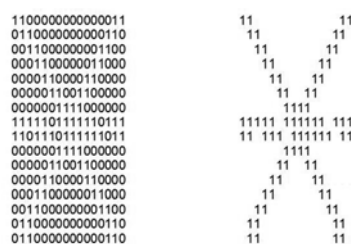


Figura 2: uno de los estados de la red cuando avanza hacia el reconocimiento.



Figura 3: un estado de la red cercano al final, en que la letra

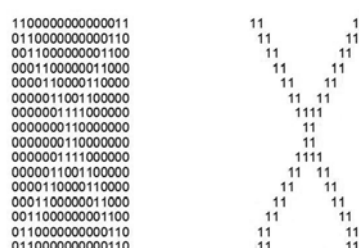


Figura 4: Resultado final cuando la letra es identificada.

ya está muy cerca de ser reconocida.

UN EJEMPLO MEDIANTE RECONOCIMIENTO DE LETRAS.

Los patrones, o memorias $\{\mu\}$ que se guardan en la red neuronal pueden ser tomados de la información codificada de un conjunto de imágenes, o de frecuencias de voces, etcétera. Aquí desarrollaremos un ejemplo de reconocimiento de letras.

Se escoge una letra del alfabeto y se dibuja sobre una cuadrícula. Enseguida se localizan los cuadros que tienen negro debido a la letra para codificarlos mediante 1-s, a su vez, los cuadros que tienen blanco se les asignan 0-s. Este es uno de los patrones o memorias a almacenar. Enseguida se toman más letras del alfabeto y se hace lo mismo hasta completar los p patrones. Los estados s de las neuronas se modifican mediante la regla algebraica $2s-1$ para tener $+1$ -s y -1 -s.

El estado inicial se toma especificando cualquier letra deformada para que se vea borrosa, o parecida a otra, por ejemplo la E y la L, o bien la O y la U.

Se opera la red con el algoritmo arriba mencionado y se obtienen resultados similares a los del siguiente ejemplo:

Partimos de una letra X deformada como se indica en la figura siguiente. A la izquierda tenemos la matriz de 1-s y 0-s que sirven para alimentar a la red neuronal, además de otras letras que se cargan en su memoria. A la derecha se observa la letra deformada.

CONCLUSIONES

La red de Hopfield que hemos descrito es un sistema sencillo que se inspira en las estructuras de las redes de neuronas biológicas y tiene aplicaciones prácticas en el reconocimiento de imágenes, voces y señales cuya estructura es conocida. Puede tener aplicaciones en criminología, en medicina para ubicar enfermedades potenciales a partir de cuadros de diagnóstico, etcétera.

REFERENCIAS

- [1] Consultar la universalidad de la neurona de McCullochs-Pitts en: A.C.C. Coolen, Neural Networks, Lectures Notes of Course CM451Z, October 1998. En línea en: http://www.mth.kcl.ac.uk/~tcoolen/allnotes/course_neuralnetworks.pdf.
- [2] Consultar la ecuación (3.18) de la referencia [1] para una discusión más general, así como la sección 3.2, donde trata las redes recurrentes estocásticas.



LIMPIEZA DE SUELOS CONTAMINADOS APLICANDO CAMPOS ELÉCTRICOS: UNA METODOLOGÍA PARA SU ESTUDIO Y EVALUACIÓN

VIRGILIO RUBIO NIEBLAS, MANUEL PÉREZ TELLO, RICHARD A. JACOBS,
JOSÉ ALFREDO ESPINOZA MELÉNDREZ, MARÍA ELENA OCHOA LANDÍN

La contaminación de suelos es un problema recurrente en muchas regiones del mundo. Cuando los residuos orgánicos ó inorgánicos, producidos por ciertas actividades humanas, son derramados en el suelo y afectan la calidad de vida de los seres vivos, se consideran contaminantes según la normatividad de protección ambiental de nuestro país. En este trabajo se describe una metodología teórico experimental para entender los fenómenos que ocurren durante el proceso de eliminación de contaminantes en suelos aplicando campos eléctricos, a fin de optimizar el rendimiento de dicho proceso. Esta tecnología de punta actualmente es estudiada en algunos países desarrollados.

M. C. VIRGILIO RUBIO NIEBLAS
Departamento de Ing. Química y Metalurgia
Correo: virgil@iq.uson.mx

DR. MANUEL PÉREZ TELLO
Departamento de Ing. Química y Metalurgia
Correo: mperez@iq.uson.mx

DR. RICHARD A. JACOBS
Consultor independiente, Houston Tx., U. S. A.
Correo: rajacobsc@gmail.com

M. C. JOSÉ ALFREDO ESPINOZA MELÉNDREZ
Departamento de Ing. Civil y Minas
Corro: jaespinoza@dicym.uson.mx

Q. B. MARÍA ELENA OCHOA LANDÍN
Departamento de Ing. Química y Metalurgia
Correo: maochoa@iq.uson.mx

EL PROBLEMA GLOBAL DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS

Históricamente, los suelos de nuestro planeta han sido contaminados como resultado de diversas actividades humanas, tales como la agricultura (1) el tratamiento de la madera, la extracción y procesamiento de metales y los conflictos bélicos, entre otras (2). En general, los contaminantes de suelos se pueden clasificar en dos grandes grupos: orgánicos e inorgánicos. Dentro de los primeros se tienen los aceites y gasolinas provenientes de la industria del petróleo, los fertilizantes, fungicidas, plásticos, etc. Dentro de los segundos se clasifican una variedad de compuestos químicos que contienen metales y otros elementos, tales como el arsénico, cobre, plomo, cadmio, mercurio, etc. A estos últimos se les denomina comúnmente metales pesados. Recientemente, la contaminación por metales pesados en sitios de minas y fábricas abandonadas ha causado serios problemas al medio ambiente y a la salud humana. Como ejemplos se tiene la contaminación por fluorita en Corea (3) y por plomo en México (4).

Adicionalmente al daño ecológico que los suelos contaminados ocasionan al hábitat de un determinado lugar, la contaminación de los suelos cercanos a las ciudades representa pérdidas de oportunidades para la instalación de nuevos centros de trabajo, y por lo tanto para el desarrollo económico. Por lo tanto, el uso de estos sitios como receptores para confinar residuos peligrosos no es una opción. Limpiarlos para darles un mejor uso es una mejor alternativa la cual es congruente con la doble responsabilidad de cuidar el medio ambiente y propiciar el desarrollo social y económico de las poblaciones.

LIMPIEZA DE SUELOS POR MEDIO DE ELECTRICIDAD

Existen varios métodos para limpiar suelos contaminados. Este artículo se centra en el proceso de eliminación electrocinética, cuya tecnología novedosa es foco de atención actual en los países desarrollados, tales como Estados Unidos y Holanda (5). El principio de funcionamiento de este proceso se muestra en la Figura 1 y consiste en aplicar un campo eléctrico al suelo contaminado a través de una serie de electrodos para provocar que los compuestos metálicos disueltos en el agua del suelo se muevan por efecto del campo eléctrico hacia alguno de los electrodos, dependiendo de la carga eléctrica del compuesto metálico en cuestión. Así, los compuestos metálicos con carga positiva se desplazarán hacia el cátodo, y aquellos con carga negativa lo harán hacia el ánodo. Al cabo de un tiempo determinado, los contaminantes se concentrarán en áreas localizadas del suelo, de donde podrán ser extraídos para su disposición final (6, 7).

El proceso de eliminación electrocinética comprende fundamentalmente tres fenómenos de transporte que ocurren simultáneamente. El primero es causado por el campo eléctrico que hace que los iones metálicos (átomos o grupos de átomos con carga eléctrica) se muevan a través del líquido contenido en los poros del suelo hacia el electrodo con carga opuesta a la del ion. A este fenómeno se le denomina electromigración. El segundo fenómeno ocurre muy cerca de la superficie de los poros del suelo. La superficie de las partículas que forman el suelo típicamente posee carga eléctrica. El líquido cercano a la superficie adquiere una carga eléctrica de signo contrario a la carga de la superficie de los poros. De nueva cuenta, este líquido es afectado por el campo eléctrico y se mueve hacia alguno de los electrodos. Arrastrando consigo el resto del líquido contenido en los poros por efectos

viscosos. El movimiento del líquido se lleva los contaminantes que se encuentran dentro de él. A este fenómeno se le llama electroósmosis. Un tercer fenómeno se presenta cuando en una región del suelo los contaminantes se encuentran con una concentración mayor a la de otra región del mismo suelo. En este caso, los contaminantes se mueven espontáneamente de la región de mayor concentración a la región de menor concentración. A este fenómeno se le conoce como difusión ordinaria y no requiere de la presencia de un campo eléctrico.

Simultáneamente a los fenómenos de electromigración, electroósmosis y difusión ordinaria descritos anteriormente, ocurren reacciones químicas entre los diferentes compuestos disueltos en el líquido del poro, entre estos y las partículas de suelo. Adicionalmente, en los electrodos negativos (cátodos) y positivos (ánodos) se presenta la descomposición electrolítica del agua. Ésta consiste en la desaparición de las moléculas de agua por acción de la corriente eléctrica para producir, respectivamente, hidrógeno y oxígeno los cuales se desprenden hacia la atmósfera en forma de gas. En los ánodos también se generan electrones, los cuales son impulsados a través de la fuente de poder hacia los cátodos.

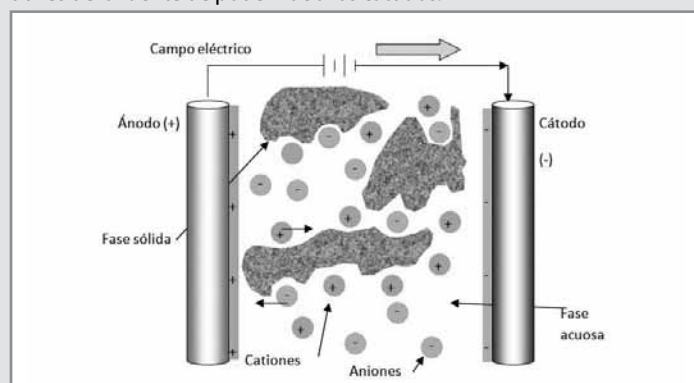


Figura 1. Principio de funcionamiento del proceso de eliminación electrocinética

La eliminación electrocinética es un proceso de bajo costo y eficiente (8) para descontaminar suelos con metales pesados. Sin embargo, antes de llevar a cabo su aplicación en gran escala es necesario realizar experimentos en el laboratorio con el fin estudiar sus características y optimizar su funcionamiento bajo condiciones controladas, en función del contaminante y tipo de suelo a tratar. Esta es una etapa decisiva en el desarrollo del proceso, ya que en cuestión de limpieza de suelos, como en muchos otros campos de la ingeniería, no existen panaceas, es decir fórmulas mágicas de uso universal.

La forma más común de estudiar este proceso es mediante el uso de prototipos llamados celdas experimentales a nivel laboratorio, como la mostrada en la Figura 2. La celda consiste de un tubo de acrílico o vidrio dentro del cual se coloca el suelo o medio poroso con el contaminante. El tubo se cierra por ambos extremos y en éstos se colocan los electrodos. Posteriormente se satura el suelo dentro del tubo con agua. Mediante experimentos controlados, el investigador aplica un voltaje conocido entre los extremos de la celda y conforme transcurre el tiempo se monitorea la concentración del contaminante y el pH del suelo a lo largo del tubo. A partir de esta información es posible determinar el grado de eficiencia del proceso.

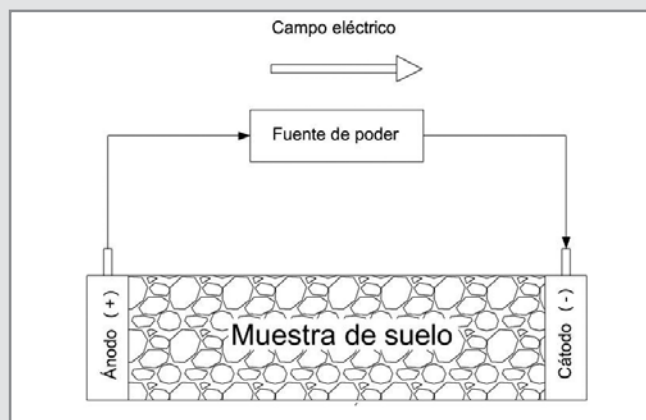


Figura 2. Esquema del sistema experimental del proceso de eliminación electrocinética en una dimensión.

A la fecha, la mayoría de los trabajos sobre eliminación electrocinética se han limitado a estudios en una sola dimensión, como el mostrado en la Figura 2. Esto implica una serie de desventajas. Por ejemplo, solamente se pueden cuantificar los fenómenos que ocurren entre dos electrodos; adicionalmente, el sistema no representa la geometría de un suelo real. Por lo tanto, realizar experimentos en dos dimensiones con más de dos electrodos representaría un avance, ya que el sistema se asemejaría en mayor grado a la realidad.

METODOLOGÍA DE ESTUDIO Y EVALUACION

La Figura 3 representa la metodología desarrollada por lo autores, la cual consta de dos partes: una parte teórica que consiste de un modelo computacional para representar los fenómenos de electromigración, electroósmosis y difusión ordinaria descritos con anterioridad, y una parte experimental. El modelo matemático es una adaptación del código original desarrollado por Jacobs y Probst en el Massachusetts Institute of Technology (6, 9). La parte experimental consiste de una celda a escala laboratorio en forma de triángulo equilátero con las esquinas redondeadas, la cual se muestra en la Figura 4. La forma triangular es con el fin de asegurar la geometría mínima para un estudio en dos dimensiones; es decir, en forma de un plano horizontal. Acorde a las condiciones del Estado de Sonora, como ejemplo se considera la eliminación de cobre como contaminante principal. Para simular el suelo se usan partículas de sílica gel de tamaño uniforme (846 micras).

Sobre este sistema se inserta un conjunto de electrodos pasivos para registrar los valores de voltaje una vez que se aplica una diferencia de potencial entre el ánodo y los cátodos. Los electrodos pasivos se localizan en cada uno de los puntos de muestreo mostrados en la Figura 4, en los cuales se mide el pH y se recolectan muestras de solución acuosa para determinar la concentración de cobre. Mediante un programa de cómputo desarrollado por los autores, los datos son capturados automáticamente y almacenados en una computadora. Posteriormente son procesados, visualizados gráficamente mediante un software especializado (10) para su posterior interpretación. Paralelamente se llevan a cabo simulaciones con el modelo computacional (6, 9) y se comparan sus predicciones con los datos experimentales obtenidos en la celda bidimensional.

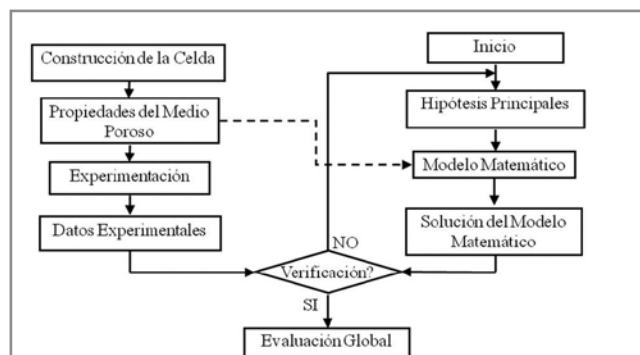


Figura 3. Metodología general para el estudio del proceso de eliminación electrocinética

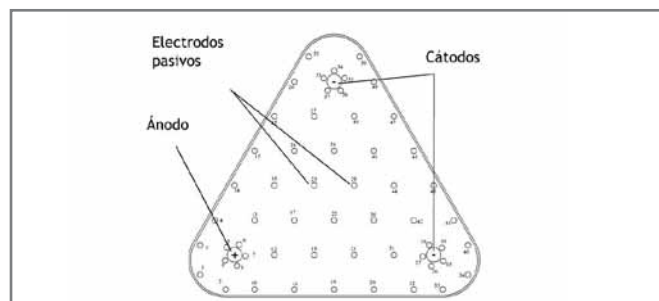


Figura 4. Esquema de la distribución de los puntos de muestreo para pH, solución de Cu y electrodos pasivos en la celda experimental.

RESULTADOS OBTENIDOS

Los datos que se muestran a continuación representan el promedio de varios experimentos en los cuales se colocaron partículas de sílica gel (SiO_2) en la celda experimental y se empacaron con una máquina compactadora eléctrica. Este dispositivo es indispensable para asegurar la reproducibilidad de los datos experimentales, y fue diseñada ex profeso para las dimensiones y geometría de la celda. Una vez compactado, el medio poroso se saturó con una solución acuosa de sulfato cúprico para asegurar una concentración inicial de cobre de 100 mg/L y simular el suelo contaminado. Para el inicio de la operación se aplicó un voltaje de 20V entre electrodos activos (ánodo y dos cátodos) y conforme transcurrió el tiempo se registraron el pH, concentración de Cu y voltaje en diversos puntos del medio poroso.

Por brevedad, se presentan los resultados al cabo de un tiempo de 96 horas. La Figura 5 muestra los contornos de voltaje medidos experimentalmente en la celda bidimensional (5a) y los calculados por el modelo computacional (5b). Considerando la complejidad del sistema bajo estudio, la comparación entre ambas figura indica que el modelo computacional reproduce razonablemente el comportamiento experimental, y puede ser utilizado como herramienta para posteriores estudios de evaluación y optimización del proceso.

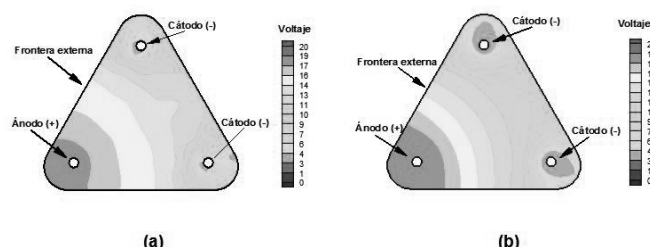


Figura 5. Potencial eléctrico en el arreglo triangular al cabo de 96 horas.

(a) Valores experimentales; (b) Valores calculados con el modelo computacional.

La Figura 6 muestra los contornos de concentración de cobre total en la fase acuosa del medio poroso. En este caso el modelo predice que el movimiento del contaminante hacia los electrodos ocurre a una rapidez ligeramente mayor a lo observado en los experimentos.

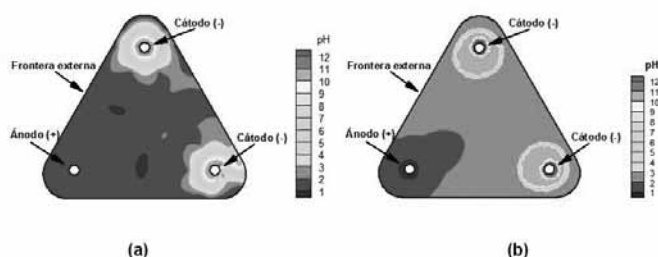


Figura 6. Concentración de cobre en el arreglo triangular al cabo de 96 horas; (a) Valores experimentales; (b) Valores calculados con el modelo computacional.

Similarmente, la Figura 7 muestra los valores de pH. Se puede observar que alrededor de los cátodos los valores de pH se incrementan pronunciadamente. El área de pH calculado por el modelo matemático es ligeramente mayor en extensión y en magnitud que los valores experimentales.

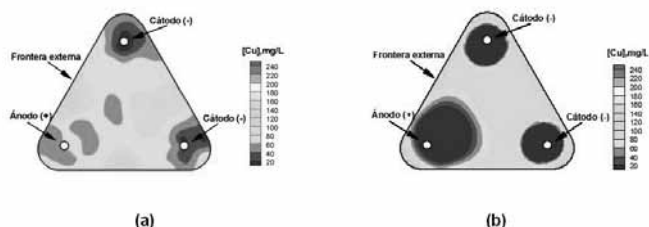


Figura 7 Valores de pH en el arreglo triangular al cabo de 96 horas; (a) Valores experimentales; (b) Valores calculados con el modelo computacional.

Las discrepancias entre los valores experimentales y las predicciones teóricas mostrados en las Figuras 5 a 7 motivan al perfeccionamiento continuo del modelo. De acuerdo a la Figura 6a, al término de 96 horas alrededor del 32% del área total ocupada por el medio poroso ha disminuido su concentración de cobre hasta valores inferiores a 50 mg/L, que es el límite de tolerancia en suelos. Potencialmente es posible mejorar el rendimiento del proceso incrementando el potencial eléctrico aplicado entre electrodos e incorporando agua de lavado para mantener un flujo constante de líquido y extraer el contaminante del medio poroso. Experimentos adicionales pueden realizarse a este respecto en la celda bidimensional para verificar estas hipótesis. Para campos de suelos extensos en los cuales la experimentación no es factible o muy costosa, una opción alternativa consiste en realizar predicciones con el modelo computacional con el fin de evaluar anticipadamente diferentes opciones de operación, a partir de las cuales sea posible establecer una estrategia de limpieza del suelo en cuestión.

CONCLUSIONES

Se presenta una metodología desarrollada en el departamento de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad de Sonora para el estudio y evaluación de la eliminación electrocinética,

el cual es un proceso novedoso para la limpieza de suelos contaminados por medio de electricidad. La metodología consta de un modelo computacional y un sistema experimental bidimensional, los cuales son utilizados de manera simultánea para esclarecer y cuantificar los fenómenos relevantes del proceso, así como para evaluar su funcionamiento bajo distintas condiciones de operación. Con el debido perfeccionamiento de ambos sistemas, será posible en el futuro planear y optimizar operaciones de limpieza de suelos reduciendo costos de operación.

BIBLIOGRAFÍA

1. Apostolos Gianis, E.G., Antigoni Skouta, Transport of cadmium and assessment of phytotoxicity after electrokinetic remediation. *Journal of Environmental Management*, 2007. 86: p. 535-544.
2. Buchireddy, P.R., R.M. Bricka, and D.B. Gent, Electrokinetic remediation of wood preservative contaminated soil containing copper, chromium, and arsenic. *Journal of Hazardous Materials*, 2009. 162(1): p. 490-497.
3. Park, S.W., et al., Electrokinetic remediation of contaminated soil with waste-lubricant oils and zinc. *Journal of Hazardous Materials*, 2009. 169(1-3): p. 1168-1172.
4. Chavez, C. Contaminación del suelo. 2009 [cited 2009; Available from: <http://www2.inec.gob.mx/publicaciones/libros/372/fuentes.html>.
5. Genc, A., G. Chase, and A. Foos, Electrokinetic Removal of Manganese from River Sediment. *Water Air and Soil Pollution*, 2009. 197(1-4): p. 131-141.
6. Jacobs, R.A. and R.F. Probstein, Two-dimensional modeling of electroremediation. *Aiche Journal*, 1996. 42(6): p. 1685-1696.
7. Probstein, R.F. and R.E. Hicks, Removal of Contaminants from Soils by Electric-Fields. *Science*, 1993. 260(5107): p. 498-503.
8. Shapiro, A.P. and R.F. Probstein, Removal of Contaminants from Saturated Clay by Electroosmosis. *Environmental Science & Technology*, 1993. 27(2): p. 283-291.
9. Jacobs, R.A., Two-dimensional modeling of the removal of contaminants from soils by electric fields. 1995, Massachusetts Institute of Technology.
10. Tecplot inc., f.A.E., Inc.), Tecplot 360, <http://tecplot.com/>. 2008: Bellevue, WA 98006.

UNA APLICACIÓN DEL TEOREMA DE BAYES EN PRUEBAS DE DIAGNÓSTICO MÉDICO.

ALEJANDRINA BAUTISTA JACOBO

Se presenta una aplicación del Teorema de Bayes en el área de medicina, particularmente en el campo de las pruebas de diagnóstico. Es de gran importancia para el médico determinar si un paciente realmente presenta una enfermedad dado que una prueba de diagnóstico le está dando un valor positivo, o en su defecto, determinar que el paciente no presenta ninguna enfermedad alarmante debido a que se está basando en un resultado negativo de una prueba. En las siguientes líneas se desarrollarán las fórmulas para determinar este grado de certeza utilizando para ello el Teorema de Bayes.

M.C ALEJANDRINA BAUTISTA JACOBO
Departamento de Matemáticas
Universidad de Sonora
Correo:ale@gauss.mat.uson.mx

LA APORTACIÓN DE THOMAS BAYES

Thomas Bayes (1702-1761) fue un matemático británico que aportó mucho al campo de la probabilidad. Particularmente, el teorema que lleva su nombre y que refiere a la probabilidad de un evento condicionado por la ocurrencia de otro, fue utilizado en el campo de la medicina, en especial para las pruebas de diagnóstico. Una prueba diagnóstica permite detectar la presencia o la ausencia de una enfermedad [1]. Para ilustrar esta aplicación, supóngase que se tiene un estudio de casos y controles, donde el evento E son los enfermos (casos) y S los sanos (controles) representados estos dos eventos mutuamente excluyentes en una tabla de contingencia de 2x2. De igual forma sea R+ el evento de dar un diagnóstico positivo a la enfermedad en una prueba y R- el de dar un resultado negativo. Ver tabla 1

Resultado de la prueba	Enfermo E	Sano S	
R+	$P(E \cap R+)$	$P(S \cap R+)$	$P(R+)$
R-			$P(R-)$
	$P(E)$	$P(S)$	

Tabla 1 Presenta los posibles resultados en una prueba de diagnóstico y las probabilidades marginales

En la tabla se muestran las probabilidades marginales $P(E)$ que representa la probabilidad de estar enfermo, $P(S)$ es la probabilidad de estar sano, $P(R+)$ es la probabilidad de dar un resultado positivo en la prueba y $P(R-)$ la probabilidad de dar un resultado negativo. Estas probabilidades regularmente se conocen, cosa que no sucede con las probabilidades conjuntas $P(E \cap R+)$ y $P(S \cap R+)$. La primera representa la probabilidad de estar enfermo y dar un resultado positivo en la prueba y la segunda indica la probabilidad de estar sano y dar un resultado positivo en la prueba.

Particularmente el médico está interesado en conocer la probabilidad de que el paciente presente la enfermedad dado que la prueba arroja un valor positivo. Esta probabilidad condicional se puede expresar como $P(E/R+)$.

Sabemos que la probabilidad condicional de un evento A dado que ha ocurrido B se define [2] como:

De igual forma se cumple que

$$1 \quad P(A/B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$$



De modo que la probabilidad

$$P(B/A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)}$$

buscada se puede expresar como:

$$P(E/R+) = \frac{P(E \cap R+)}{P(R+)}$$

De la tabla 1 se puede observar que:

$$2 \quad P(E/R+) = \frac{P(E \cap R+)}{P(E \cap R+) + P(S \cap R+)}$$

Si sustituimos esta expresión en la ecuación (1) tenemos que:

$$P(E \cap R+) = P(R+) * P(E/R+)$$

De la ecuación (1) podemos despejar el término del numerador:

$$3 \quad P(E \cap R+) = P(E) * P(R+/E)$$

Sabemos que $P(E \cap R+) = P(R+ \cap E)$ [3] y podemos ver que también se cumple:

Análogamente tenemos que:

$$4 \quad P(S \cap R+) = P(S) * P(R+/S)$$

Si sustituimos las ecuaciones (3) y (4) por su término equivalente en la ecuación (2), tenemos que:

$$5 \quad P(E/R+) = \frac{P(E) * P(R+/E)}{P(E) * P(R+/E) + P(S) * P(R+/S)}$$

La ecuación resultante de estas sustituciones es llamada el Teorema de Bayes.

VALOR PREDICTIVO POSITIVO (VPP)

Ahora bien, en medicina, la probabilidad de estar enfermo dado que la prueba arrojó un valor positivo se le conoce como Valor Predictivo Positivo (VPP) [4]. Utilizando esta simbología tenemos que:

$$VPP = \frac{P(E) * P(R+/E)}{P(E) * P(R+/E) + P(S) * P(R+/S)}$$

A la probabilidad de estar enfermo se le conoce como la Prevalencia [4], y un concepto muy utilizado en este campo es la Sensibilidad de una prueba de diagnóstico. Esta representa la probabilidad de acertar en el diagnóstico, es decir, representa la probabilidad de dar un resultado positivo en los enfermos [4]. De modo que:

$$\text{Sensibilidad} = P(R+ / E)$$

Sustituyendo estos conceptos en la expresión del Teorema de Bayes tenemos:

$$VPP = \frac{\text{prevalencia} * \text{sensibilidad}}{\text{prevalencia} * \text{sensibilidad} + P(S) * P(R+ / S)}$$

Nos quedan todavía los términos de $P(S)$ y $P(R+/S)$.

Sabemos que E y S son dos eventos mutuamente excluyentes y que se cumple que:

$$P(E) + P(S) = 1$$

Despejando de esta expresión $P(S)$ tenemos que:

$$P(S) = 1 - P(E) \quad \text{ó} \\ P(S) = 1 - \text{prevalencia}$$

TASA DE LOS FALSOS POSITIVOS

Por otro lado, $P(R+/S)$ representa la probabilidad de dar un resultado positivo en las personas sanas. Esta probabilidad es conocida como la tasa de los falsos positivos y es un tipo de error que se comete en las pruebas de diagnóstico [5].

De modo que la expresión para VPP puede expresarse como:

Los valores de la tabla 1 pueden reescribirse en términos de sus cardinalidades. Esto se muestra en la tabla 2.

$$VPP = \frac{\text{prevalencia} * \text{sensibilidad}}{\text{prevalencia} * \text{sensibilidad} + (1 - \text{prevalencia}) * \text{tasa de falsos positivo}}$$

Tenemos que:

Resultado de la prueba	Enfermo E	Sano S
R+	VP	FP
R-	FN	VN

Tabla 2 Presenta los valores en un estudio de casos y controles.

VP: significa verdaderos positivos, es decir, están enfermos y la prueba les dio positivos.

VN: verdaderos negativos; están sanos y la prueba les dio negativo.

FP: falsos positivos; están sanos y la prueba les dio positivo.

FN: falsos negativos; son pacientes enfermos que la prueba les da negativo.

Otro concepto muy mencionado en las pruebas de diagnóstico es la especificidad. Ésta representa la capacidad que tiene la prueba para detectar la ausencia de la enfermedad en personas sanas [5], esto es, $P(R-/S)$, llamada también la tasa de los verdaderos negativos. Por la definición de la probabilidad condicional tenemos que:

$$\text{especificidad} = P(R- / S) = \frac{P(R- \cap S)}{P(S)}$$

Observe cómo la $P(R+/S)$, que es la tasa de los falsos positivos y la especificidad son calculadas sobre el total marginal de personas sanas, de modo que sus valores son complemento. Es decir, 1-especificidad nos da la tasa de los falsos positivos.

Así que la expresión para el valor predictivo positivo queda concluida como

$$VPP = \frac{\text{prevalencia} * \text{sensibilidad}}{\text{prevalencia} * \text{sensibilidad} + (1 - \text{prevalencia}) * (1 - \text{especificidad})}$$

Observe cómo la probabilidad de que el paciente realmente tenga la enfermedad, dado que la prueba da positivo, está en función de la prevalencia, sensibilidad y especificidad, conceptos conocidos por el médico.

VALOR PREDICTIVO NEGATIVO (VPN)

De igual forma, podemos definir la probabilidad de estar sano, dado que la prueba da un resultado negativo. A este concepto se le llama Valor Predictivo Negativo (VPN). Expresado como probabilidad condicional, tenemos que

$$VPN = P(S / R-) = \frac{P(S \cap R-)}{P(R-)}$$

Observe en la tabla 3 cómo también se cumple que:

$$P(R-) = P(E \cap R-) + P(S \cap R-)$$

Resultado de la prueba	Enfermo E	Sano S	
R+	$P(E \cap R+)$	$P(S \cap R+)$	$P(R+)$
R-	$P(E \cap R-)$	$P(S \cap R-)$	$P(R-)$
	$P(E)$	$P(S)$	

Tabla 3 Presenta las probabilidades conjuntas y marginales

Así que, aplicando de nuevo el Teorema de Bayes tenemos:

$$VPN = \frac{P(S) * P(R-/S)}{P(S) * P(R-/S) + P(E) * P(R-/E)}$$

Expresando de nuevo la probabilidad de sanos en términos de la prevalencia, y sabiendo que la $P(R-/S)$ es la especificidad, tenemos que:

$$VPN = \frac{(1 - \text{prevalencia}) * \text{especificidad}}{(1 - \text{prevalencia}) * \text{especificidad} + \text{prevalencia} * P(R-/E)}$$

Anteriormente se había hablado que el concepto de sensibilidad expresa la probabilidad de dar un resultado positivo entre los enfermos, es decir, $P(R-/E)$. Ésta probabilidad es llamada también la tasa de los verdaderos positivos, y a $P(R-/E)$, que representa la probabilidad de dar un resultado negativo entre los enfermos se le conoce como la tasa de los falsos negativos. Tenemos que los valores de ambas probabilidades son complementarios, de modo que $P(R-/E)$ la podemos expresar en términos de la sensibilidad, es decir, $P(R-/E) = 1 - \text{sensibilidad}$. Así que nuestra expresión para el Valor predictivo negativo es:

$$VPN = \frac{(1 - \text{prevalencia}) * \text{especificidad}}{(1 - \text{prevalencia}) * \text{especificidad} + \text{prevalencia} * (1 - \text{sensibilidad})}$$

Así pues, conocer la probabilidad de que un paciente esté enfermo dado el resultado positivo de la prueba, o no tener la enfermedad dado un resultado negativo de la prueba, depende de la prevalencia de la enfermedad así como de la sensibilidad y especificidad de la prueba.

UNA APLICACIÓN HIPOTÉTICA.

Se hizo un estudio de casos y controles, donde los casos eran personas que padecían de glaucoma y los controles personas sanas. El glaucoma es un trastorno que se presenta en el nervio óptico y se debe al aumento de la presión en un ojo, también conocida como presión intraocular (PIO) [6]. Para medir la presión intraocular el médico utiliza una prueba de tonometría [7]. Para una persona normal, el tonómetro debe registrar una medida entre 10 y 20 mmHg, así que una presión intraocular alta se considera a partir de 21 mmHg [8]. Si el médico sabe que aproximadamente un 7% de la población padece de glaucoma y que la sensibilidad de tonómetro es del 87.5 y tiene una especificidad del 91% ¿Cuál es la probabilidad de que un paciente realmente tenga glaucoma dado que la lectura en el tonómetro fue mayor de 20 mmHg?

Para este caso calculemos el VPP:

$$VPP = \frac{\text{prevalencia} * \text{sensibilidad}}{\text{prevalencia} * \text{sensibilidad} + (1 - \text{prevalencia}) * (1 - \text{especificidad})}$$

Según la información proporcionada, la prevalencia de la enfermedad es de 0.07, por tanto, $(1 - \text{prevalencia})$ que es la probabilidad de estar sano, es de 0.93. La sensibilidad es de 0.875 y la especificidad es de 0.91. La probabilidad de los falsos positivos $(1 - \text{especificidad})$ es igual a 0.09. Así que la probabilidad de tener glaucoma dado un resultado positivo en el tonómetro es:

$$VPP = \frac{(0.07) * (0.875)}{(0.07) * (0.875) + (0.93) * (0.09)} = 0.42$$

Claro que el médico también debe de basar su diagnóstico en otros factores de riesgo como son antecedentes familiares, la edad, raza, enfermedades como el diabetes, etc.

Es importante mencionar que en muchos de los textos de epidemiología o de bioestadística médica expresan las fórmulas de estos conceptos de una manera más simple. Éstos se basan en una tabla de contingencia como las que ya se han presentado en este escrito, pero con una notación diferente para los valores dentro de las casillas. Ver la tabla 4.

Resultado	Enfermo	Sano	Total
R+	A	B	A+B
R-	C	D	C+D
Total	A+C	B+D	A+B+C+D

De modo que las expresiones para el cálculo de sensibilidad, especificidad, valores predictivos positivos y negativos y además la prevalencia pueden expresarse como:

$$\text{sensibilidad} = \frac{A}{A + C}$$

$$\text{especificidad} = \frac{D}{B + D}$$

$$VPP = \frac{A}{A + B}$$

$$VPN = \frac{D}{C + D}$$

$$\text{prevalencia} = \frac{A + C}{A + B + C + D}$$

Puede verse que en las primeras cuatro expresiones está implícita la probabilidad condicional.

CONCLUSIONES

Hasta aquí, se ha intentado presentar una aplicación sencilla y sin complejas demostraciones de la probabilidad condicional y el Teorema de Bayes. Cabe la pena mencionar que no es la única en este campo, existen otras como por ejemplo en los estudios de equivalencia, monitorización de ensayos clínicos, evaluación de datos locales, etc. Asimismo, en otras áreas como las ciencias sociales y la ingeniería, por mencionar algunas, se presenta también la aplicación de la teoría bayesiana.

BIBLIOGRAFÍA

- Greenberg, R.S; Daniels, S.R.; Flanders, W.D.; William, E.J.; Boring, J.R. Epidemiología Médica. Editorial Manual Moderno, México D.F. (2005), p 89-92
- Pagano, M.; Gauvreau, K. Fundamentos de Bioestadística. Editorial Thomson Learning. México D.F. (2001), p 129
- Lipschutz, S. Probabilidad. Editorial McGraw-Hill, México D.F. (2001)
- Guerrero, V.; González, C. L.; Medina, E. Epidemiología. Editorial Addison-Wesley Iberoamericana (1986).
- Morton, R.F; Hebel, J.R; McCarter, J. Bioestadística y epidemiología: con 125 preguntas de elección múltiple. Editorial Interamericana, México D.F. (1993)
- <http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/article/001620.htm>, consultado el 17 de septiembre del 2010.
- <http://www.docshop.com/es/education/vision/eyediseases/glaucoma/diagnosis/>, consultada el 17 de septiembre del 2010.
- <http://ocularis.es/blog/?p=40>, consultada el 18 de septiembre del 2010.

EL CONSUMO DE ALCOHOL EN LAS ENTIDADES DEL NORTE DE MÉXICO ¿UN PROBLEMA DE SALUD PÚBLICA EN LOS ESTADOS FRONTERIZOS?

SALVADOR PONCE SERRANO

El consumo nocivo de alcohol en las personas tiene graves consecuencias en su salud y productividad. Se debe contar con cifras e indicadores para cuantificar la magnitud del problema para poder sugerir medidas correctivas y preventivas. Las encuestas nacionales son herramientas que contienen datos valiosos que permiten diversos análisis para caracterizar la información sobre este problema. En este documento se identifica la magnitud del problema de consumo de alcohol a partir de los datos de la Encuesta Nacional de Adicciones 2008, se comparan los indicadores de consumo excesivo en la frontera norte, en cada uno de los estados que la integran y los datos promedio del país. La frecuencia de consumo excesivo encontrada en la población de la frontera norte fue 60.6 hombres y 14.5 mujeres por cada 100 personas, en edades de 12 a 65 años, Aunque el consumo consuetudinario es mas típico de la región que en el resto del país, predomina el consumo alto, sobre todo en cuatro estados, entre ellos, Sonora.

SALVADOR PONCE SERRANO
Médico Cirujano. Maestro en Salud Pública
Profesor de asignatura. @mail: salponse@hotmail.com
Departamento de Medicina
División de Ciencias Biológicas y de la Salud
Universidad de Sonora. Campus Hermosillo.